

Université Lumière Lyon 2 – Université de Lyon

Institut de Psychologie

École doctorale : Neurosciences et Cognition

Discipline : Sciences cognitives mention neurosciences

Thèse en vue de l'obtention du grade de docteur
de l'université Lyon 2

Étude d'indices acoustiques dans le traitement temporel de la
parole chez des adultes normo-lecteurs et des adultes
dyslexiques.

Présentée et soutenue publiquement par

Caroline Jacquier

Le 9 octobre 2008

Directeur de Thèse : Pr. Lionel Collet
Tutrice scientifique : Dr. Fanny Meunier

Composition du jury :

Pr. Lionel Collet, Université Claude Bernard Lyon 1 (Directeur de thèse)
Pr. Alain Content, Université Libre de Bruxelles (Rapporteur)
Dr. Fanny Meunier, Université Lumière Lyon 2 (Tutrice scientifique)
Dr. Ronald Peereman, Université Pierre Mendès France de Grenoble
Dr. Sharon Peperkamp, Université Paris 8
Dr. Willy Serniclaes, Université Paris 5 (Rapporteur)
Dr. Evelyne Veuillet, Université Claude Bernard Lyon 1

Laboratoire Dynamique Du Langage – CNRS UMR 5596

Je dédie cette thèse à mes parents.

REMERCIEMENTS

Merci à ma tutrice scientifique, le docteur Fanny Meunier-Hoen, qui m'a intégrée dans son équipe de recherche. Merci pour tout ce que vous m'avez apporté et pour m'avoir toujours suivie de près comme de loin. Merci pour la confiance et l'autonomie que vous m'avez accordée et pour vos nombreux conseils. Merci de m'avoir transmis votre rigueur scientifique et de m'avoir toujours fais garder les pieds sur terre. J'ai été ravie et honorée de travailler sous votre tutelle.

Merci au professeur Lionel Collet d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse. Merci pour l'expertise et la confiance que vous m'avez accordées.

Merci au professeur Alain Content et au docteur Willy Serniclaes, mes rapporteurs, d'avoir pris leur rôle très au sérieux durant cette période de vacances.

Merci aux docteurs Veuillet, Peperkamp et Peereman, membres du jury, d'avoir accepté d'être présents à ma soutenance et d'avoir manifesté votre intérêt pour mon travail.

Remerciements spéciaux au Professeur René Carré pour nos discussions dynamiques et fructueuses.

Merci à François Pellegrino, directeur du laboratoire Dynamique Du Langage, pour m'avoir accueillie et pour avoir très souvent répondu à mes innombrables questions et m'avoir orientée dans la bonne direction.

Merci à tous les DDLeurs et DDLeuses pour votre accueil, pour votre gentillesse et votre bonne humeur. Merci pour votre soutien moral. Merci d'avoir partagé vos connaissances sans limite. Merci pour tout et longue vie à DDL et aux DDLers !!! Merci également à Michel Hoen pour son enthousiasme et ses idées lumineuses.

Merci¹ au Professeur Risto Näätänen et au docteur Teija Kujala de m'avoir invitée au Cognitive Brain Research Unit (CBRU) à Helsinki. Merci à Rika Takegata et à Satu Pakarinen pour votre disponibilité, vos conseils et votre savoir-faire. Je suis très heureuse et très fière d'avoir collaborer avec vous. Merci à tous les membres du CBRU de m'avoir accueillie chaleureusement. Merci aux amis que j'ai rencontrés en Finlande, sans qui l'hiver finlandais aurait été très rude : Maria, les expat' restés au pays, Giuseppe et Nathalie, et les expat' qui ont fui le pays, Floriane et Antoine. Kitos !

Merci aux stagiaires de l'école des Psychologues Praticiens : Aude, Charlotte, Noémie et Pauline qui m'ont apporté une aide considérable et qui ont montré de l'intérêt pour mon travail. Bonne route à vous...

Merci aux nombreuses personnes qui ont gentiment participé à mes études et qui ont pleinement contribué à mes résultats. Je tiens à remercier plus particulièrement les participants dyslexiques qui ont dû parfois faire de gros efforts pour venir et parler de leur dyslexie. Toutes ces rencontres ont été enrichissantes et bénéfiques.

Merci à tous mes amis qui sont éparpillés dans différentes villes : Lyon, Paris, Auxerre, Avignon, Morgnieu, Romans, Vesoul, Toulouse, La Marsa, Helsinki. Vous avez été un moteur très important et je vous remercie d'être toujours là.

Merci à mes parents, mon frère et ma belle-sœur pour leur soutien, leur patience et leur amour tout au long de cette aventure. Je remercie toute ma famille qui a toujours porté beaucoup d'intérêt à mon travail, ainsi que Cécile et Charly.

Merci, Thanks, Choukrane, Kitos, Danke, Grazie, Obrigado, Xie Xie ...

ركش ت

¹ Thanks to Pr. Risto Näätänen and Dr. Teija Kujala for inviting me at CBRU. Thanks to Rika Takegata and to Satu Pakarinen for your supervision, your availability, your advices and your experience. I am very happy and proud of our collaboration. Thanks to all my colleagues at CBRU who had a warmly welcome for me. Thanks to my friends I have encountered in Finland without whom winter would have been very hard: Maria, Giuseppe and Nathalie, Floriane and Antoine.

Étude d'indices acoustiques dans le traitement temporel de la parole chez des adultes normo-lecteurs et des adultes dyslexiques

Quotidiennement, nous sommes confrontés à un signal de parole dégradé qui perturbe notre perception. Cependant, malgré cette distorsion du signal, la parole reste intelligible ce qui met en évidence nos capacités de compensation. Dans cette thèse, nous étudions les effets de la réduction temporelle d'indices acoustiques, tels que le voisement et les transitions formantiques, sur l'intelligibilité de la parole. Deux populations ont été étudiées, un groupe d'adultes normo-lecteurs normo-entendants et un groupe de dyslexiques adultes normo-entendants. Les résultats chez les lecteurs experts permettent, d'une part, de constater le rôle et le poids des traits phonétiques manipulés ainsi que l'existence de processus de compensation de l'information manquante. D'autre part, une corrélation entre les performances d'identification de la parole compressée et les capacités en lecture, notamment au niveau de l'étape de traitement phonologique, a pu être observée. Ma thèse apporte également de nouvelles preuves d'un déficit auditif de traitement temporel de la parole chez les adultes dyslexiques. Les traits phonétiques manipulés sont traités différemment par les dyslexiques et les normo-lecteurs. De plus, l'étude du système auditif met en évidence des différences anatomo-fonctionnelles liées aux performances des dyslexiques en perception de parole. L'étude des détails acoustiques fins du signal de parole permet une meilleure connaissance des indices acoustiques primordiaux impliqués dans le traitement de la parole, ce qui permettrait également de répondre aux difficultés de certaines pathologies du langage, comme la dyslexie, et d'améliorer les méthodes de rééducation.

Mots-clés : Perception de la parole dégradée, compression temporelle, indices acoustiques, traits phonétiques, voisement, VOT, transitions formantiques, dyslexie adulte.

Temporal speech perception of acoustic cues for expert readers and dyslexic adults

Everyday, we are faced with degraded speech signal. However speech remains intelligible meaning that we are able to deal with these variations. This dissertation investigates the effects of time-compression of acoustic cues on speech perception. Two acoustic cues are studied: voicing and formant transitions. The performances of two populations are compared: expert readers and dyslexic adults. On the one hand, expert readers' results highlight the role and the relative weight of each phonetic feature and the existence of mechanisms of restoration. On the other hand, we observed a correlation between compressed speech identification performances and reading abilities, particularly at the phonological stage. My dissertation provides new evidence for an auditory deficit of temporal processing in dyslexic adults. Phonetic features are differentially processed by expert readers and dyslexics. In addition, a study of the auditory system reveals anatomo-functional differences in relation with speech perception of dyslexics. The study of fine acoustic details allows for a better understanding of crucial acoustic cues involved in speech processing; which in turn would improve our knowledge of language disorders, like dyslexia, and enhance methods of remediation.

Keywords: Degraded speech perception, time-compression, acoustic cues, phonetic features, voicing, VOT, formant transitions, dyslexic adults.

TABLE DES MATIÈRES

<i>Introduction Générale</i>	<i>1</i>
Chapitre 1 Cadre Théorique	7
1.1. La variabilité du signal de parole	8
1.1.1. La segmentation du signal de parole	9
1.1.2. La catégorisation	11
1.1.3. La coarticulation	14
1.1.4. La théorie motrice (Lieberman & Mattingly, 1985)	17
1.1.5. La théorie Hypo- et Hyper-articulation (Lindblom, 1990)	19
1.2. La production des sons de parole : Quelques généralités	20
1.2.1. La théorie source-filtre	20
1.2.2. Les occlusives	23
1.3. Les traits phonétiques	25
1.3.1. Le Voisement	27
1.3.2. Le lieu d'articulation	28
1.4. Les modèles psycholinguistiques de reconnaissance des mots parlés	30
1.4.1. Le modèle logogène (Morton, 1969)	31
1.4.2. Le modèle de la « Cohorte » (Marslen-Wilson & Welsh, 1978)	31
1.4.3. Le modèle de recherche sérielle (Forster, 1976)	32
1.4.4. Le modèle TRACE (McClelland & Elman, 1986)	33
1.4.5. Le modèle Shorlist (Norris, 1994)	34
1.4.6. Conclusion	34
1.5. La robustesse du signal de parole	36
1.5.1. La résolution temporelle	38
1.5.2. L'enveloppe temporelle	39
1.5.3. La perception de la parole dans le bruit	40
1.5.4. La parole inversée temporellement	40
1.6. La compression temporelle de la parole	42
1.6.1. La production naturelle de la parole rapide	43
1.6.2. Le phénomène d'adaptation	45
1.7. Le système auditif	47
1.7.1. Le système auditif périphérique	47
1.7.1.1. L'oreille externe	47
1.7.1.2. L'oreille moyenne	48
1.7.1.3. L'oreille interne	49
1.7.2. Le système auditif central	51
1.7.3. Le croisement des voies auditives	52
1.8. Les aires cérébrales du langage	53
1.8.1. Le modèle classique	53
1.8.2. Le lobe pariétal inférieur	54
1.8.3. Le modèle de Wernicke-Geschwind	55
1.9. Le traitement et l'intégration des informations sonores	56

Chapitre 2	<i>La perception de la parole : dimension temporelle</i>	59
2.1.	Introduction	59
2.2.	Problématique et Hypothèses	61
2.3.	Expérience 1 : Compression temporelle du trait de voisement	63
2.3.1.	Méthode	63
2.3.1.1.	Stimuli	63
2.3.1.2.	Procédure	66
2.3.1.3.	Participants	66
2.3.1.4.	Plan expérimental	66
2.3.2.	Résultats	68
2.3.2.1.	Modèle mixte	68
2.3.2.2.	L'analyse qualitative des erreurs	71
2.3.3.	Discussion	75
2.3.3.1.	L'effet de Position	75
2.3.3.2.	L'effet de la Compression temporelle	75
2.3.3.3.	Les occlusives voisées	75
2.3.3.4.	Les occlusives non voisées	76
2.4.	Expérience 2 : Compression temporelle du trait de lieu d'articulation	78
2.4.1.	Méthode	78
2.4.1.1.	Stimuli et Procédure	78
2.4.1.2.	Participants	78
2.4.1.3.	Plan expérimental	78
2.4.2.	Résultats	79
2.4.2.1.	ANOVA mixte	79
2.4.2.2.	Analyse qualitative des erreurs	81
2.4.3.	Discussion	83
2.4.3.1.	L'effet de Position	83
2.4.3.2.	L'effet de la Compression temporelle	84
2.4.3.3.	L'effet du lieu d'articulation	84
2.5.	Expérience 3 : Compression temporelle des deux traits	86
2.5.1.	Méthode	86
2.5.1.1.	Stimuli et Procédure	86
2.5.1.2.	Participants	86
2.5.1.3.	Plan expérimental	86
2.5.2.	Résultats	87
2.5.2.1.	La variabilité interindividuelle	87
2.5.2.2.	ANOVA mixte	88
2.5.2.3.	Analyse qualitative des erreurs	91
2.5.3.	Discussion	95
2.5.3.1.	L'effet de la Position	95
2.5.3.2.	L'effet de la Compression temporelle	95
2.5.3.3.	La relation entre les deux traits	96
2.5.3.4.	La variabilité interindividuelle	98
2.6.	Expérience 4 : Compression linéaire	99
2.6.1.	Méthode	99
2.6.1.1.	Stimuli et Procédure	99
2.6.1.2.	Participants	99
2.6.1.3.	Plan expérimental	99
2.6.2.	Résultats	100
2.6.2.1.	ANOVA mixte	100
2.6.2.2.	Analyse qualitative des erreurs	103
2.6.3.	Discussion	106
2.6.3.1.	L'effet de Position	106
2.6.3.2.	L'effet de la Compression temporelle	106
2.6.3.3.	Le phénomène de redondance	107
2.7.	Analyse Acoustique des traits	108

2.7.1.	Mesure du voisement	108
2.7.1.1.	Les occlusives voisées	108
2.7.1.2.	Les occlusives non voisées	108
2.7.2.	Mesures de la transition du second formant	109
2.7.2.1.	La durée de la transition	109
2.7.2.2.	La pente de la transition du second formant	111
2.7.3.	Corrélations	112
2.7.4.	Discussion	115
2.7.4.1.	La durée du voisement	115
2.7.4.2.	La durée des transitions	115
2.7.4.3.	La pente de la transition du second formant	115
2.7.4.4.	Les corrélations	116
2.8.	Discussion Générale	118
2.8.1.	L'effet de compression temporelle	118
2.8.2.	La redondance des indices acoustiques	119
2.8.3.	Le rôle relatif de chaque indice acoustique	119
2.8.4.	L'effet de coarticulation	123
2.8.5.	L'effet de position de la consonne	124
2.8.6.	La durée de l'occlusion	125
2.8.7.	L'amplitude du burst	126
2.8.8.	La durée du burst	127
2.9.	Conclusion	128

Chapitre 3 *Les corrélats auditifs et phonologiques de la variabilité interindividuelle* **131**

3.1.	Introduction	131
3.2.	Les modèles de reconnaissance de mots en lecture	133
3.2.1.	Le modèle en stades (Frith, 1985)	135
3.2.2.	Le modèle de la double voie (Coltheart, 1978)	136
3.2.3.	Le modèle de la double voie en cascade (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001)	137
3.2.4.	Le modèle à activation interactive (McClelland & Rumelhart, 1981)	138
3.2.5.	Le modèle à traitement parallèle distribué (Seidenberg & McClelland, 1989)	139
3.3.	Le test auditif et de lecture	141
3.3.1.	L'évaluation des seuils auditifs	141
3.3.2.	Le logiciel ECCLA (Évaluation des Capacités Cognitives du Lecteur Adulte)	141
3.4.	Problématique et Hypothèses	143
3.5.	Partie expérimentale	144
3.5.1.	Méthode	144
3.5.1.1.	Participants	144
3.5.1.2.	Procédure	144
3.5.1.3.	L'audiométrie tonale	145
3.5.1.4.	Test de lecture	146
3.5.2.	Résultats	148
3.5.2.1.	L'audiométrie Tonale	148
3.5.2.2.	Les capacités de lecture	149
3.5.2.3.	Les corrélations	150
3.5.3.	Discussion	157
3.5.3.1.	Les corrélats auditifs	157
3.5.3.2.	Les corrélats phonologiques	158
3.5.3.3.	Les corrélations	159
3.5.3.4.	Conclusion	160

Chapitre 4 La dyslexie ou un déficit du traitement temporel du signal de la parole __ 163

4.1. Introduction	164
4.2. La dyslexie développementale	165
4.2.1. La définition	165
4.2.2. Le retard de lecture	167
4.2.3. Le trouble spécifique du langage	167
4.2.4. Le diagnostic de la dyslexie développementale	167
4.2.5. Les grandes formes de dyslexie développementale	169
4.2.6. La dyslexie développementale chez l'adulte	172
4.2.7. Les habiletés élémentaires de traitement phonologique et la lecture	174
4.2.7.1. La conscience phonémique	174
4.2.7.2. La perception des catégorielle	176
4.2.7.3. La lecture	177
4.2.8. Les troubles associés de la dyslexie développementale	178
4.2.8.1. La dysphasie	178
4.2.8.2. La dysorthographe	179
4.2.8.3. La dyscalculie	179
4.2.8.4. La dyspraxie/La dysgraphie	179
4.2.8.5. Les troubles de mémoire à court terme	179
4.3. Les différentes théories sur les mécanismes cognitifs responsables de la dyslexie développementale	180
4.3.1. La théorie du déficit phonologique	180
4.3.2. La théorie magnocellulaire	183
4.3.2.1. La théorie du déficit du traitement temporel visuel	183
4.3.2.2. La théorie du déficit du traitement temporel auditif	185
4.3.2.3. Conclusion	188
4.4. Les corrélats neurobiologiques de la dyslexie	190
4.4.1. Le sexe ratio et la cause hormonale	190
4.4.2. Les causes génétiques	191
4.4.3. Les études <i>post-mortem</i>	192
4.4.3.1. Les anomalies anatomiques	192
4.4.3.2. La latéralisation hémisphérique	193
4.4.4. Les études en imagerie cérébrale	193
4.4.4.1. L'imagerie structurale	193
4.4.4.2. Imagerie fonctionnelle	195
4.5. Problématique et Hypothèses	198
4.6. Expérience 1 : Compression temporelle du trait de voisement	202
4.6.1. Méthode	202
4.6.1.1. Participants	202
4.6.1.2. Évaluation Neuropsychologique des participants dyslexiques	202
4.6.2. Résultats : Comparaison des dyslexiques et des normo-lecteurs	207
4.6.2.1. Analyse de la variance (ANOVA)	208
4.6.2.2. Analyse qualitative des erreurs	212
4.6.3. Discussion	216
4.6.3.1. Les occlusives voisées en position d'attaque	216
4.6.3.2. Les occlusives voisées en position intervocalique	217
4.6.3.3. Les occlusives non voisées en position d'attaque	217
4.6.3.4. Les occlusives non voisées en position intervocalique	218
4.6.3.5. Le contraste voisé/non voisé chez les dyslexiques	218
4.7. Expérience 2 : Compression temporelle du trait de lieu d'articulation	220
4.7.1. Méthode	220
4.7.1.1. Participants	220
4.7.2. Résultats	220
4.7.2.1. Analyse de la variance (ANOVA)	222
4.7.2.2. Analyse qualitative des erreurs	225
4.7.3. Discussion	228

4.7.3.1.	Les occlusives bilabiales	228
4.7.3.2.	Les occlusives alvéolaires	229
4.7.3.3.	Le contraste bilabiale/alvéolaire chez les dyslexiques	229
4.8.	Discussion Générale	231
4.8.1.	Le voisement	231
4.8.2.	Le lieu d'articulation	232
4.8.3.	Les consonnes occlusives : un point faible	233
4.8.4.	La proximité phonétique	234
4.8.5.	La saillance acoustique	235
4.8.6.	Le poids respectif des indices	235
4.8.7.	La redondance des indices	235
4.8.8.	Un aperçu de méthodes d'entraînement	236

Chapitre 5 L'étude des voies auditives descendantes: comparaison dyslexiques adultes vs. contrôles adultes **239**

5.1.	Introduction	239
5.1.1.	Les voies auditives descendantes	240
5.1.1.1.	L'anatomie des systèmes efférents olivocochléaires	241
5.1.1.2.	Les projections olivocochléaires	241
5.1.1.3.	La physiologie olivocochléaire	242
5.1.1.4.	Les rôles des systèmes efférents olivocochléaires dans l'audition	242
5.1.2.	Les otoémissions acoustiques	245
5.1.2.1.	La définition	245
5.1.2.2.	La physiologie des OEA	246
5.1.2.3.	L'enregistrement des OEA	247
5.1.3.	La mesure des effets du SEOCM à l'aide des OEAP	248
5.1.4.	La latéralisation cérébrale	249
5.1.5.	L'asymétrie centrale auditive	250
5.2.	Problématique et Hypothèses	253
5.3.	Partie Expérimentale	255
5.3.1.	Participants	255
5.3.2.	Tests Audiométriques (critères d'inclusion)	255
5.3.2.1.	L'audiométrie tonale	255
5.3.2.2.	La tympanométrie	256
5.3.2.3.	Résultats	257
5.3.3.	Exploration fonctionnelle des voies auditives descendantes du système efférent	257
5.3.3.1.	Méthode	257
5.3.3.2.	Procédure	258
5.3.3.3.	Résultats	258
5.3.3.4.	Discussion	267
5.3.4.	Tests Psychométriques	273
5.3.4.1.	Résultats	273
5.3.4.2.	Corrélation du fonctionnement du SEOCM avec les mesures psychométriques	285
5.3.4.3.	Discussion	285
5.3.5.	Expérience 1 : Compression temporelle du trait de voisement	289
5.3.5.1.	Comparaison des trois groupes	289
5.3.5.2.	Corrélation du fonctionnement du SEOCM et des performances d'identification auditive des consonnes	290
5.3.5.3.	Discussion	290
5.3.6.	Expérience 2 : Compression temporelle du trait de lieu d'articulation	292
5.3.6.1.	Comparaison entre les trois groupes	292
5.3.6.2.	Corrélation du fonctionnement du SEOCM et des performances d'identification auditive des consonnes	293
5.3.6.3.	Discussion	294
5.4.	Discussion Générale	295
5.4.1.	Les traits acoustiques	295

5.4.2.	L'encodage neuronal temporel	296
5.4.2.1.	Le niveau sous-cortical	297
5.4.2.2.	Le niveau cortical	298
5.4.3.	L'implication du SEOCM dans la perception de la parole compressée	299
5.5.	Conclusion	299
 <i>Conclusion Générale</i>		 301
 ANNEXES		 333

Introduction Générale

La perception de la parole est un phénomène complexe qui nécessite des étapes particulières de réception, d'intégration et d'analyse du signal acoustique. La reconnaissance des mots parlés nécessite plusieurs étapes : la première étape consiste à segmenter le signal acoustique et à catégoriser les sons de la parole. Une représentation phonémique des sons de la parole est ainsi établie. Le problème majeur dans l'établissement de ces correspondances entre l'entrée auditive et les représentations phonémiques réside dans la variabilité du signal acoustique. Cette variabilité peut être soit de nature intrinsèque, soit de nature extrinsèque. Par exemple, des modulations du signal peuvent provenir lors d'un changement de débit du locuteur impliquant des phénomènes de coarticulation et d'assimilation. Le signal de parole peut également être affecté par le bruit environnant. Ces différentes sources de variabilité peuvent donc engendrer une baisse d'intelligibilité et de compréhension de la parole. Cependant, malgré cette variabilité importante, nous sommes capables de maintenir une bonne intelligibilité du signal de parole. Même si le signal acoustique de la parole est dégradé, le signal reste intelligible pour l'auditeur. Nous avons donc la capacité de normaliser les multiples formes que peuvent prendre un même message. Cette normalisation dépend du degré de détérioration du signal et de la nature des indices acoustiques altérés.

Le but de ce travail est donc d'examiner l'intelligibilité de la parole dans des conditions d'écoute dégradée. Ces conditions correspondent à une réalité écologique dans la vie de tous les jours. En effet, la communication se fait rarement dans le silence total ou à débit constant. Dans cette thèse, nous nous focalisons sur les modifications de la dynamique temporelle de la parole. Lorsque la parole est compressée temporellement, l'organisation temporelle du signal de parole va être modifiée, ce qui va ralentir ou empêcher l'extraction des indices acoustiques et donc la mise en correspondance avec les représentations cognitives phonémiques. Il apparaît, cependant, que nous sommes capables de percevoir et comprendre un message de parole prononcé très rapidement. Mais dans le cas de pathologie présentant un trouble de perception de la parole, comme la dyslexie, nous nous poserons la question de l'origine cognitive de ce trouble.

Nous cherchons donc à décrire les mécanismes de substitution ou de normalisation qui permettent une bonne intelligibilité du signal de parole dégradé. Ces mécanismes peuvent s'appuyer sur des connaissances lexicales ce qui correspond à des effets *top-down* mais ils

peuvent également utiliser les informations du signal lui-même afin de remplacer l'information perdue. L'un des différents niveaux de représentation du signal acoustique correspond aux traits acoustico-phonétiques qui sont spécifiques de la parole. Ces traits peuvent être redondants et certains sont plus importants que d'autres dans l'identification du signal de parole. L'intérêt d'étudier la représentation du signal de parole à ce niveau précisément est que nous pouvons faire la correspondance entre les caractéristiques acoustiques et articulatoires de la parole.

Nous allons nous intéresser particulièrement à la dimension temporelle de deux traits acoustico-phonétiques contenus dans le signal de parole : le voisement et les transitions des formants. Les mesures acoustiques des indices manipulés correspondent à deux traits distinctifs qui permettent d'identifier le signal de parole. Nous explorons le poids relatif des indices acoustiques dans la perception de la parole et leur résistance à la manipulation temporelle chez des adultes normo-lecteurs. Chez le normo-lecteur, nous explorons les mécanismes et les informations nécessaires qui permettent de maintenir une bonne intelligibilité du signal de parole dans des conditions temporelles rapides. Plus nous connaissons nos capacités de réparation du signal dégradé et notamment les indices importants dans cette identification, plus nous pourrions envisager d'améliorer la compréhension de personnes ayant des troubles auditifs. Les troubles de perception de la parole sont présents également dans d'autres pathologies, comme la dyslexie. La sensibilité perceptive vis-à-vis de ces deux indices acoustiques sera donc également étudiée chez des dyslexiques adultes. Ces expériences visent à mieux cibler les difficultés perceptives des dyslexiques lors de la perception de la parole et donc d'agir précisément sur leurs points faibles par des méthodes d'entraînement adaptées.

Les objectifs principaux de cette thèse sont donc, premièrement, d'examiner le traitement du signal de parole lorsque la dynamique temporelle est compressée, nous observerons les effets sur l'intelligibilité de la parole dans le but de mettre en évidence des mécanismes de substitution. Et deuxièmement, nous nous focaliserons sur la description de la nature et du rôle relatif de traits acoustiques indispensables à une bonne intelligibilité de la parole. L'altération temporelle des indices acoustiques permettra de mettre en évidence les traits pertinents et donc le poids de chaque indice dans l'intelligibilité du signal. L'étude chez les sujets normo-lecteurs sera suivie d'une étude comparative avec un groupe de dyslexiques adultes. Puis, d'une étude plus approfondie du fonctionnement du système auditif descendant des dyslexiques adultes afin d'expliquer leur déficit de traitement auditif temporel de la parole.

Dans le Chapitre 1, les principales notions théoriques nécessaires à une bonne analyse des expériences faites dans cette thèse, seront abordées. Tout d'abord, je présenterai les problèmes liés à la perception de la parole, notamment, ceux liés à la variabilité du signal de parole. Le signal acoustique ne présente pas ou peu d'invariants, il est donc difficile de l'identifier facilement. La segmentation du signal de parole est un problème mais des indices existent pour faciliter la coupure entre les mots. La notion de perception catégorielle sera également abordée. Ces différentes notions entrent en jeu lors de l'évaluation de l'intelligibilité du signal de parole. Puis, je ferai un bref rappel sur la production des sons de parole de la langue française, en particulier les consonnes occlusives qui seront l'objet de nos stimuli. Je m'arrêterai également sur les unités distinctives du signal : les phonèmes. Plus particulièrement, je m'attarderai sur la notion de trait distinctif et notamment, sur deux traits phonétiques spécifiques : le voisement et le lieu d'articulation. Ces deux traits acoustiques seront les principaux protagonistes de nos expériences. Ensuite, je présenterai les différents modèles psycholinguistiques de reconnaissance des mots parlés. Puis, un large aperçu des études portant sur la compression temporelle de la parole sera développé. Pour clore ce chapitre théorique, je présenterai, les différents niveaux de traitement de l'information sonore. Le système auditif périphérique et central ainsi que les aires cérébrales impliquées dans le traitement de la perception de la parole. Lors de cette ascension vers les aires cérébrales, un codage temporel et fréquentiel du signal est effectué. La dimension temporelle est alors traitée séparément de la dimension fréquentielle. La dimension temporelle est primordiale pour une bonne intelligibilité de la parole. Dans mes expériences, j'utiliserai de la parole naturelle compressée temporellement, par synthèse. Ce premier chapitre expose les différents thèmes traités dans cette thèse. Les quatre chapitres suivants comporteront tous une partie expérimentale.

Dans le Chapitre 2, j'examinerai les effets de la compression temporelle d'indices acoustiques sur l'intelligibilité de la parole. Quatre expériences seront présentées : une première portant uniquement sur la réduction de la durée du voisement (Expérience 1), une seconde portant seulement sur la compression de la durée des transitions formantiques (Expérience 2), une troisième dans laquelle les durées des deux indices acoustiques sont réduits en même temps (Expérience 3) et une quatrième où le signal entier est compressé de manière homogène (Expérience 4). Je montre que la modification temporelle a un effet sur l'intelligibilité de la parole et que les deux indices acoustiques sont traités différemment. L'intelligibilité du signal de parole varie selon le degré de compression et selon la nature du trait phonétique manipulé. Des phénomènes de substitution ou de remplacement de

l'information manquante sont mis en évidence. Une analyse acoustique est également présentée sur les durées des deux indices acoustiques ainsi que sur la pente des transitions. Des corrélations entre les performances d'identification auditive des stimuli et la durée des indices acoustiques ont été obtenues. Il semblerait que la durée du voisement soit un indice temporel pertinent dans l'intelligibilité de la parole alors que ce n'est pas tant la durée des transitions qui est importante mais les changements fréquentiels rapides (i.e. la pente).

Dans le Chapitre 3, j'approfondis les résultats obtenus dans le Chapitre 2 dans l'Expérience 3. Une forte variabilité interindividuelle a en effet été mise en évidence, correspondant à une très bonne identification de la parole par une partie des participants alors que d'autres présentaient plus de difficultés. Par conséquent, dans ce chapitre, je me suis arrêtée sur les raisons possibles de cette variabilité interindividuelle. Au préalable, une partie théorique expose nos axes de recherche sur, premièrement une auditive et, deuxièmement, une hypothèse phonologique pouvant expliquer cette variabilité entre les individus. Nous évaluerons donc l'audition et les capacités en lecture de nos participants. De plus, pour présenter le lien entre la perception de la parole et la lecture, nous décrirons des modèles de reconnaissance de mots en lecture qui laissent une place importante à la phonologie. Dans la partie expérimentale, j'ai tout d'abord exploré le domaine auditif mais sans montrer de différences significatives entre les participants donc l'hypothèse d'un corrélat auditif n'a pas été validée. Par contre, j'ai mis en évidence une corrélation entre les performances d'identification auditive de la parole compressée (Expérience 3) et les capacités de lecture des participants. Les participants avec de mauvais taux d'identification de la parole compressée étaient de mauvais lecteurs, en comparaison à l'autre groupe qui avaient de bonnes performances d'identification et qui étaient de très bons lecteurs. La différence entre les deux groupes porte notamment sur l'étape de conversion des graphèmes en phonèmes qui paraît déficientes chez les mauvais lecteurs et donc chez les mauvais participants à l'Expérience 3. Ce chapitre m'a conduit directement au parallèle avec la dyslexie.

Le Chapitre 4 découle donc directement des chapitres précédents. Tout d'abord, une partie théorique est développée dans le but de fournir une définition et une description de la dyslexie développementale. Je discute également des différentes théories actuelles sur les mécanismes cognitifs responsables de la dyslexie développementale. Dans cette étude, je fais l'hypothèse d'un déficit de traitement auditif temporel du signal de la parole chez les dyslexiques adultes. Comme pour le Chapitre 1, les Expériences 1 et 2 sont reprises avec des participants dyslexiques adultes. Leurs résultats d'identification de la parole compressée sont comparés à un groupe contrôle d'adultes experts en lecture. Les dyslexiques présentent un déficit de

traitement auditif temporel des indices acoustiques, dans la condition de parole naturelle et encore plus lorsque la durée des indices diminuent. Ils sont plus sensibles au contraste voisé/non voisé (Expérience 1) qu'à celui bilabiale/alvéolaire (Expérience 2). Ils présentent un traitement différentiel des deux traits phonétiques. Les dyslexiques sont plus sensibles à la réduction de durée du voisement qu'à la réduction temporelle de la durée des transitions. Cependant, ils sont très sensibles aux changements fréquentiels rapides de ces transitions (i.e. la pente). Un déficit de traitement auditif temporel du signal de parole est alors montré chez les dyslexiques adultes.

Dans le Chapitre 5, dans le but d'appuyer les précédents résultats d'un déficit auditif de traitement temporel chez les dyslexiques adultes, j'ai exploré le système auditif de ces participants à la recherche d'une anatomie et/ou d'un fonctionnement différents du système auditif pouvant expliquer leur déficit de traitement temporel du signal de parole. Une partie théorique ouvre le chapitre sur les voies auditives descendantes et plus précisément, sur le système efférent olivocochléaire médian (SEOCM). Des études portant sur la perception de la parole dans le bruit ont déjà mis en évidence l'implication du SEOCM dans cette perception. La question qui est donc posée ici est de savoir si le SEOCM est également impliqué dans la perception de la parole compressée et si un déficit de traitement auditif temporel de la parole est corrélé à un SEOCM défaillant. Je présente ensuite la méthode d'enregistrement des otoémissions acoustiques et de l'évaluation du SEOCM. Puis, je m'arrête sur la notion de latéralisation cérébrale et sur les phénomènes de changement d'asymétrie centrale auditive. Ces deux points seront explorés chez nos dyslexiques adultes comparés à un groupe contrôle. Le résultat le plus marquant est que notre groupe de dyslexiques adultes se divise en deux sous-groupes avec une asymétrie centrale auditive inversée. La moitié présente une asymétrie à droite et l'autre moitié à gauche. Des corrélations entre les différentes mesures auditives, les mesures psychométriques et les performances d'identification auditive aux Expériences 1 et 2, montrent que les deux sous-groupes ont un SEOCM défaillant lié à un déficit de traitement temporel ou fréquentiel du signal de parole. Deux voies compensatoires semblent se profiler chez nos dyslexiques adultes.

Dans le Chapitre 1 suivant, comme je l'ai annoncé précédemment, les principaux concepts théoriques vont vous être présentés, des problèmes de variabilité et de la notion de traits distinctifs au traitement temporel du signal de parole par le système auditif en passant par la production des sons de parole et la compression temporelle de la parole.

Chapitre 1

Cadre Théorique

« Les paroles seules comptent. Le reste est bavardage. »

Eugène Ionesco

Alors que la plupart des études utilisent des sons de parole synthétisés ou des conditions d'écoute contrôlées (de laboratoire), le signal de parole dans des conditions naturelles d'écoute, auxquelles les auditeurs sont confrontés tous les jours, est très variable. Le signal de parole naturelle subit de multiples modulations soit par des facteurs intrinsèques au locuteur (variabilité inter-individuelle) soit par des facteurs extrinsèques (réverbération). Nous allons donc présenter des études portant sur différents types d'altération du signal de parole (parole dans le bruit, parole inversée et parole compressée) : dans cette thèse, nous allons nous intéresser plus particulièrement aux modulations temporelles intrinsèques subies par le signal acoustique. L'intégrité de la dynamique temporelle du signal est primordiale pour permettre une bonne identification de la parole. Malheureusement, cette temporalité est souvent altérée dans la communication de tous les jours, comme par exemple, lors de changement de débit du locuteur. La parole accélérée naturellement par le locuteur, nous allons le voir, est moins intelligible que la synthèse de parole compressée. Dans cette thèse, nous travaillerons donc à partir d'un enregistrement de parole naturelle à un débit normal et nous effectuerons une compression temporelle sur ce signal.

1.1. La variabilité du signal de parole

Dans le cas de la perception de la parole, le traitement du signal acoustique est complexe du fait des caractéristiques mêmes du signal de parole. Le premier point est le caractère directionnel du signal de parole. Contrairement au langage écrit où le traitement du mot entier est possible car disponible à l'œil (si la longueur du mot n'est pas trop grande), le signal de parole subit une contrainte temporelle correspondant à l'ordre dans lequel les sons arrivent aux oreilles.

Le second point est la nature continue du signal de parole. Contrairement à l'écriture où la frontière entre les mots est marquée par un espace blanc, le signal de parole ne présente pas de frontières simples entre les mots, le flux est donc dit continu. Cette dernière caractéristique pose des difficultés, notamment, pour segmenter le signal en unités phonétiques discrètes.

Le troisième point est la variabilité du signal de parole. À l'écrit, le français (comme l'anglais) est une langue avec une orthographe opaque où la correspondance entre les lettres et les sons de parole (phonèmes) est souvent ambiguë, contrairement à l'italien qui a une orthographe transparente. Cette observation se retrouve également à l'oral où les sons ne sont quasiment jamais produits de la même façon entre les individus ou par le même individu et, selon les conditions de communication. Une infinité de formes sonores différentes peut donc correspondre à un seul phonème d'où la difficulté d'établir des correspondances directes entre les sons et les représentations phonétiques. L'auditeur se retrouve face à différentes prononciations, et pourtant, il est capable de décoder correctement le signal de parole. Par exemple, dans un dialogue spontané, le quart des éléments phonémiques est perdu (superposition ou/et coarticulation) comme si le locuteur avait effacé certains indices acoustiques nécessaires à l'établissement des représentations phonétiques des sons de parole. De plus, 30% des phones sont prononcés de manière substantiellement différente de la représentation phonémique (Greenberg, 1999). D'où la difficulté inhérente de traitement et d'identification du signal de parole. Malgré certains indices invariants, la quantité d'information n'est pas suffisante pour obtenir un pourcentage élevé d'identification correcte. L'absence d'invariants rend la parole difficile à traiter automatiquement. Elle ne permet pas de relier un à un le son et le phonème perçu. Des études ont été menées afin de trouver des propriétés invariantes de structures phonétiques spécifiques (Kewley-Port, 1983 ; Stevens & Blumstein, 1981 ; Sussman, McCaffrey, & Matthews, 1991). L'explosion des consonnes occlusives comportent des informations quasiment invariantes sur le lieu d'articulation des consonnes (Blumstein & Stevens, 1979). Sussman et al. (1991) montrent une invariance

structurelle des formants. Stevens et Blumstein (1978) explorent ces indices invariants pour le trait de lieu d'articulation, en manipulant plusieurs caractéristiques acoustiques de consonnes occlusives dans des contextes différents (p. ex. le burst et les transitions). Les auteurs concluent qu'il existe des indices invariants selon le contexte vocalique. Nous pouvons donc nous appuyer sur certains indices du signal de parole pour identifier celle-ci, quelques soient les conditions d'écoute.

La variabilité des sons de parole est en partie attribuée au phénomène de coarticulation que nous aborderons plus longuement par la suite. La coarticulation rend compte d'un chevauchement des gestes articulatoires sur l'axe temporel. Les indices acoustiques vont donc être distribués sur le signal. Au niveau des traits phonétiques, on parlera d'assimilation.

Ces trois caractéristiques, directionnalité, continuité et variabilité, compliquent la reconnaissance des mots parlés. Pour que les mots soient correctement identifiés, deux problèmes majeurs doivent être résolus : la segmentation et la catégorisation.

1.1.1. La segmentation du signal de parole

Lorsque l'on écoute de la parole, on a l'impression qu'elle est composée d'un enchaînement de sons distincts. La séparation des mots à partir du flux de la parole est indispensable à la compréhension du discours et à l'accès lexical. La plupart des systèmes d'écriture possèdent des espaces blancs entre les mots. Dans le signal de parole, il n'existe pas d'indices clairs et univoques qui permettent de marquer le début et la fin des mots. La parole est dite « continue » : la segmentation est donc une étape majeure dans la reconnaissance des mots parlés. Selon un schéma classique des modèles de reconnaissance des mots parlés, la segmentation du signal de parole intervient entre le niveau acoustique d'entrée du stimulus et le niveau des représentations infra-lexicales (unités phonétiques). Ensuite, la représentation phonétique s'aligne et s'apparie avec les représentations lexicales pour reconnaître le mot. Les mots sont représentés sous forme phonologique (abstraite) dans le lexique et il existe des processus de comparaison entre l'entrée phonétique et la représentation linguistique (voir section 1.4). Le système doit donc, dès le départ, être capable de gérer les manifestations acoustiques variables. La question importante est de savoir comment nous arrivons à traiter la variabilité du signal de parole. En situation de conversation normale, la forme phonétique de l'énoncé est différente de la représentation phonologique sous-jacente. On a donc une ambiguïté transitoire dans la chaîne parlée ce qui nécessite un choix de segmentation afin d'activer le bon candidat lexical.

La segmentation correspond au découpage du signal acoustique en unités discrètes linguistiques. Des difficultés apparaissent notamment dans plusieurs contextes comme l'acquisition de la langue maternelle, la reconnaissance de mots parlés et l'acquisition d'une seconde langue, du fait de la double articulation. Cependant, des stratégies ont été mises en évidence pour pallier à ce problème de segmentation. Jusczyk (1999) rapporte les différentes études qui ont exploré la manière de segmenter la parole par des enfants. Cette revue d'études met en avant la sensibilité d'enfants anglais, dès l'âge de 10 ; 5 mois à d'autres indices de segmentation que l'accent, comme par exemple des indices allophoniques ou encore des règles phonotactiques. L'auteur montre que ces enfants peuvent utiliser de multiples indices pour trouver la frontière entre les mots en perception auditive, ce qui permet la reconnaissance des mots parlés. Il existe donc des processus de segmentation par l'auditeur, c'est-à-dire qu'il y aurait des indices dans le signal qui indiqueraient le début et la fin des mots. Ces indices sont de nature différente : il y a les indices acoustiques, métriques et phonotactiques (Banel & Bacri, 1997).

En ce qui concerne les indices acoustiques, ils correspondent, par exemple, à la longueur des voyelles qui est différente selon la position dans le mot, à la montée de fréquence fondamentale de la voyelle initiale (en français), à l'allongement de la consonne placée au début du mot et à l'allongement de la dernière syllabe des mots de contenu. Les auditeurs sont capables d'exploiter ces indices : lorsqu'on leur demande de faire un choix, ils sont capables de segmenter correctement un énoncé ambigu. Pour expliquer ce phénomène, Dumay, Content et Frauenfelder (1999), ont utilisé le paradigme *online* du *Word Spotting*. Les participants devaient détecter le plus rapidement possible un mot dans une séquence sans signification, ce qui reflète l'activité de segmentation du signal de parole en temps réel. Les stimuli contiennent des marques acoustiques de frontière qui indique un potentiel début de mot.

Quant aux indices métriques (ou prosodiques), ils correspondent à l'unité de mesure qu'est la syllabe et à l'accent. Le français est une langue avec un rythme syllabique (Mehler, Dommergues, Frauenfelder, & Segui, 1981). Il n'existe pas d'effet de segmentation syllabique pour les anglais. Sebastián-Gallés, Dupoux, Segui et Mehler (1992) montrent une segmentation syllabique en Catalan seulement pour les syllabes initiales non accentuées. L'anglais, étant une langue à accent, possède deux types de syllabes : les syllabes accentuées ou fortes qui contiennent des voyelles pleines et les syllabes faibles qui contiennent des voyelles réduites ou schwa. Or, seulement 9.8% des mots commencent par une voyelle faible. Par conséquent, la plupart des mots en anglais monosyllabiques ou polysyllabiques ont leur

première syllabe accentuée. Il existe une forte corrélation entre le début d'un mot et la syllabe forte (Cutler & Norris, 1988). Par conséquent, nous avons tendance à insérer des frontières avant des syllabes fortes ; même si ce n'est pas le cas (p. ex. « an allergy » au lieu « analogy »). De plus, nous avons tendance à enlever des frontières avant une syllabe faible (p. ex. « my gorgeous » au lieu de « my gorge **is** »). Nous utilisons donc une stratégie de manière inconsciente qui consiste à segmenter le signal à chaque syllabe forte, on obtient un succès quasi-total à 90%. L'information prosodique joue donc un rôle important dans la segmentation lexicale.

Pour finir, les indices phonotactiques correspondent à des règles d'association des phonèmes qui existent dans les langues. Ces règles phonotactiques sont différentes selon les langues. En français, l'enchaînement de certains phonèmes est illégal en début ou en fin de syllabe (p. ex. /pz/) alors qu'il est possible à la frontière entre deux mots. Ces séquences semblent donc faciliter la segmentation (Banel & Bacri, 1997).

En dehors de la prise en compte de ces indices pour segmenter la parole, il est possible de prendre en compte les opérations qui sous tendent la compétition lexicale, c'est-à-dire que la compétition entre les candidats lexicaux va résoudre automatiquement le problème. Les inhibitions latérales jouent un rôle important dans cette compétition lexicale.

Nous venons de voir que certains indices acoustiques, voire invariants, faciliteraient la segmentation et la reconnaissance du signal de parole. Le second problème, après la segmentation, associé au caractère variable de la parole est la catégorisation. Les difficultés de catégorisation viennent du fait qu'un son n'a pas de représentation phonétique bi-univoque, ce qui complique l'appariement d'un son avec une catégorie.

1.1.2. La catégorisation

La reconnaissance de la parole consiste à partir du signal continu qui arrive à nos oreilles, de segmenter ce signal continu en unités discrètes, les phonèmes, puis d'apparier cette représentation infra-lexicale avec les entrées du lexique. Les phonèmes sont perçus sur un mode catégoriel. La question posée ici est comment nous passons du signal acoustique continu et variable à des représentations catégorielles.

Plusieurs études ont été réalisées sur ce phénomène de perception catégorielle (Eimas & Corbit, 1973 ; Liberman, Harris, Hoffman, & Griffith, 1957 ; Repp, 1984). La perception catégorielle se définit comme la discrimination des seules différences entre phonèmes et non

des variantes acoustiques d'un même phonème (Lieberman, Harris, Hoffman, & Griffith, 1957). Dans une expérience d'identification d'un stimulus le long d'un continuum qui va d'une catégorie perceptive à une autre, les réponses des sujets basculent brusquement d'une catégorie à l'autre. La tâche d'identification détermine donc la frontière entre les catégories phonétiques. Alors que dans une tâche de discrimination de deux stimuli le long d'un continuum, les sujets sont meilleurs lorsque les deux stimuli appartiennent à deux catégories différentes que lorsque les deux stimuli sont des variantes d'une même catégorie. Cela veut dire que l'auditeur est peu sensible aux différences entre les sons appartenant à une même catégorie phonémique. La tâche de discrimination permet donc de dire si la discrimination est bonne à travers les frontières des phonèmes (inter-catégorielle) ou faible à l'intérieur des catégories (intra-catégorielle). Ce qui correspond à la perception catégorielle. Par exemple, la modulation de l'indice acoustique, le *Voice Onset Time* (VOT), peut altérer la perception catégorielle des phonèmes (Abramson & Lisker, 1970 ; Lisker & Abramson, 1964). La frontière phonétique dans le signal de parole change avec les variations de VOT. Un continuum artificiel fabriqué pour donner toute une gamme d'intermédiaires acoustiques entre deux sons, par exemple, entre un [ba] et un [pa] (Figure 1). La frontière phonétique divise le stimulus auditif en deux catégories : [b] et [p]. Quand on demande à des sujets naïfs de retranscrire (tâche d'identification) ce qu'ils entendent, on obtient généralement une catégorisation très franche : la plupart des stimuli sont perçus soit comme [pa], soit comme [ba] et la transition entre les deux catégories est très abrupte (Figure 2). Si on présente maintenant deux stimuli assez peu différents sur le continuum entre [ba] et [pa] et que l'on demande aux sujets d'effectuer une tâche de discrimination (les deux stimuli sont-ils identiques ou non ?), on obtient ici encore des réponses assez tranchées. La plupart des paires de stimuli sont très difficiles à discriminer, sauf à l'endroit de la frontière catégorielle (pic de discrimination), où la performance devient très bonne. En résumé, la perception catégorielle correspond au fait qu'il est beaucoup plus difficile de discriminer une paire de stimuli quand ils sont à l'intérieur d'une catégorie qu'à la frontière entre deux catégories, même quand la distance acoustique entre les membres d'une paire est maintenue identique.

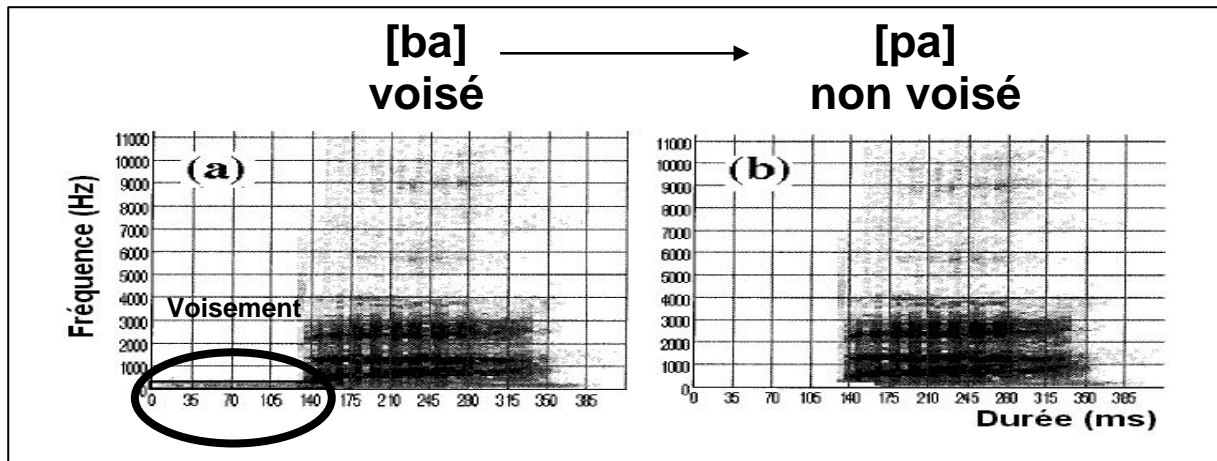


Figure 1 : Représentations spectrographiques des sons [ba] et [pa], (a) On remarque la barre de voisement pour [ba] alors qu'il n'y en a pas pour [pa] (b).

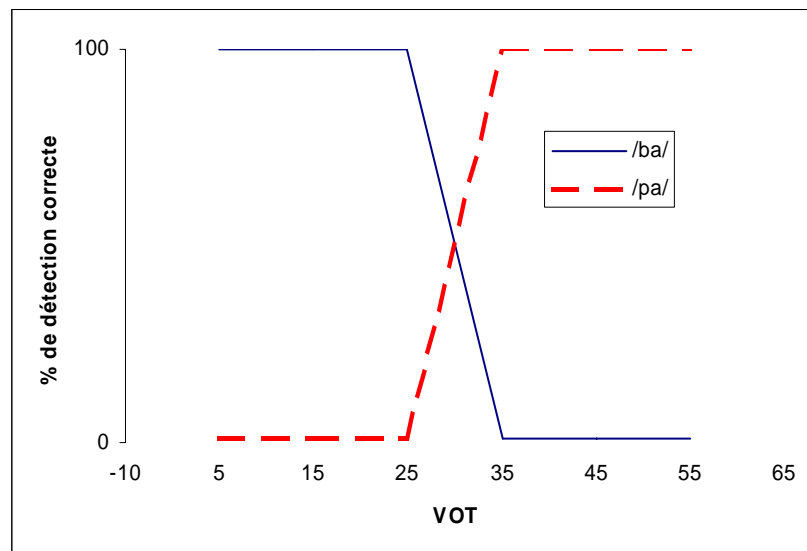


Figure 2 : Frontière catégorielle lors d'une tâche d'identification d'un continuum [ba]-[pa].

Des facteurs phonétiques et linguistiques influencent la frontière catégorielle et peuvent l'altérer (Repp & Liberman, 1987). Le lieu d'articulation comme le débit influencent la perception des stimuli dans la région de la frontière entre voisée et non voisée mais également la perception des stimuli à l'intérieur de la catégorie non voisée. Les processus dépendant du contexte peuvent donc avoir lieu au-delà des frontières entre les catégories, ainsi qu'au sein d'une catégorie. La perception catégorielle est un phénomène dynamique non-linéaire (Tuller, Case, Ding, & Kelso, 1994). Les catégories phonétiques ont une structure graduée, un meilleur exemplaire (plus prototypique) au centre de la catégorie (Kuhl, 1991 ; Miller, 2001 ; Miller, Connine, Schermer, & Kluender, 1983 ; Miller & Volaitis, 1989). Cet exemplaire correspond à une structure possédant les détails les plus fins sur la représentation acoustico-

phonétique (« fine phonetic detail », Hawkins, 2003). Selon Kuhl (1991), les sons sont identifiés par comparaison avec ces prototypes et les différences perçues entre les sons diminuent lorsqu'on se rapproche du prototype. Les facteurs acoustico-phonétiques peuvent altérer la perception de ce meilleur exemplaire de la catégorie, comme par exemple, le changement de débit du locuteur qui modifie la position du meilleur exemplaire. L'auditeur est très sensible à la gradation des catégories ce qui révèle une représentation phonétique très richement structurée. Dans notre étude, la compression temporelle de la parole va par conséquent induire des confusions phonétiques perceptives, du fait de l'influence du raccourcissement de la durée d'indices acoustiques. La frontière catégorielle va contenir une zone d'ambiguïté dans laquelle les erreurs vont être plus fréquentes.

Dans cette partie, nous avons donc montré que le problème le plus important dans l'identification de la parole est la variabilité du signal acoustique. Les variations sont de différentes natures et ces phénomènes rendent difficile l'établissement des représentations phonémiques des sons de parole. Les problèmes de segmentation et de catégorisation dérivent pour une part des phénomènes de coarticulation. Le phénomène de coarticulation, dont l'assimilation en est une manifestation, produit de la variabilité et complique donc la reconnaissance des mots parlés. Le signal de parole est très variable et l'absence d'invariants rend encore plus difficile l'encodage et le traitement du signal acoustique. La question qui se pose est comment la perception humaine résout ce problème de variabilité. La coarticulation peut faciliter la perception de la parole, mais elle implique également des variations importantes du signal physique de parole. Elle ne permet pas que le signal puisse être découpé en morceaux séparés par des frontières clairement repérables. Les sons s'influencent entre eux et fournissent des indices acoustiques aux segments adjacents.

1.1.3. La coarticulation

Les travaux ultérieurs issus des laboratoires d'Haskins ont montré que la catégorisation phonétique était un processus extrêmement complexe. L'une des découvertes fondamentales de cette recherche est qu'il n'existe pas de correspondance bi-univoque entre les propriétés acoustiques des stimuli et la structure des catégories phonétiques. L'un des facteurs qui rend cette mise en correspondance très complexe est appelé la coarticulation (Liberman, Cooper, Shankweiler, & Studdert-Kennedy, 1967). Un problème basique de la perception de la parole est que l'on ne produit pas chaque phonème indépendamment, du fait de la transmission rapide de l'information. Les sons de parole sont coarticulés c'est-à-dire que les gestes

articulatoires d'un même phonème se chevauchent, sur l'axe temporel, à ceux des phonèmes adjacents. La coarticulation correspond à la répartition d'informations acoustiques sur un ensemble de syllabes ou sur plusieurs syllabes consécutives. Par exemple, dans le mot 'qui', les gestes articulatoires pour [k] et pour [i] démarrent en même temps, résultant dans un signal mêlant les informations pour les deux segments.

La coarticulation nous permet de produire des séquences de segments à un débit très élevé, mais complique considérablement la perception : le premier problème est celui de la segmentation, tout fragment de signal acoustique contient nécessairement des informations pertinentes pour plusieurs traits phonétiques. La coarticulation va augmenter le taux d'informations phonétiques transmises ce qui peut compliquer les mécanismes de perception car cela s'oppose à une simple correspondance entre les gestes phonétiques et les indices acoustiques successifs. Il est donc impossible de diviser le signal acoustique en morceaux discrets qui correspondraient à notre perception discrète en phonèmes. Mais la coarticulation peut également générer de la redondance, ce qui facilite la perception. La coarticulation facilite le traitement du son suivant (Martin & Bunnell, 1981 ; Whalen, 1991). Lorsque le débit de la parole s'accélère, il existe un phénomène de coarticulation important. De plus, la coarticulation dépend de ce qui précède et de ce qui suit donc la variabilité contextuelle est importante empêchant encore davantage de séparer les phonèmes un à un (Perkell & Klatt, 1986). Le second problème, appelé problème de la variabilité acoustique, est dû au fait que les propriétés acoustiques qui permettent d'identifier un segment donné varient avec le contexte dans lequel il apparaît. Par exemple, la forme de l'information acoustique caractéristique de [k] suivit par [i] est différente de celle pour [k] suivit de [u]. De plus, étant donnée la nature des processus articulatoires, un même contraste phonétique est signalé par plusieurs indices acoustiques qui interagissent entre eux : c'est le phénomène de redondance du signal (Lisker, 1986).

La coarticulation se manifeste, notamment sous la forme de phénomènes d'assimilation correspondant au transfert des caractéristiques ou des traits d'un son sur un son immédiatement voisin ou parfois aussi à distance. La direction des assimilations, régressives (vers la gauche), progressives (vers la droite) ou double (dans les deux sens) est déterminée par deux caractéristiques. D'une part, la position du son dans la syllabe ou le mot. Un son qui se trouve en position initiale de syllabe ou de mot, se trouve dans une position forte et peut transmettre une ou plusieurs de ses caractéristiques à des sons voisins. En revanche, un son qui termine une syllabe ou un mot, se trouve dans une position faible et influencera plus difficilement son entourage. Il s'agit donc ici de la force positionnelle relative des sons.

D'autre part, la force articulatoire du son peut jouer un rôle : plus la force articulatoire d'un son est élevée, plus il est capable de transmettre ses propriétés à son entourage. Delattre (1966b) propose le classement suivant pour le français : [p t k] force 1 (les consonnes les plus fortes), [l f] force 2, [b d g m n s ʃ] force 3, [ɲ j] force 4 et [ʁ w ɥ v z ʒ] force 5 (les consonnes les moins fortes). La force dont il est question ici est la force intrinsèque relative des sons.

La réalisation phonétique d'un mot est déterminée par les propriétés du phonème au début du mot qui le suit ou par celles du phonème à la fin du mot qui le précède. Par exemple, la paire robe/grise comporte deux consonnes voisées à la suite donc le /b/ reste, mais dans le cas de la paire robe/sale, une consonne voisée et une non voisée se succèdent donc le /b/ devient un /p/. C'est une assimilation de voisement. En anglais, le phénomène d'assimilation s'effectue sur le lieu d'articulation, par exemple, les consonnes dentales, /d/, /t/ et /n/, changent l'expression *green bag* en *greem bag* (Lahiri & Reetz, 2002). Dans ces deux exemples, le phonème en position initiale du mot transfère certaines caractéristiques phonétiques au phonème final du mot précédent.

En ce qui concerne l'accès à la représentation du mot assimilé, il existe trois hypothèses. La première hypothèse est que le système tolère un défaut d'appariement de forme de surface. La seconde hypothèse correspond à un phénomène de « sous-spécification », c'est-à-dire que la caractéristique qui change n'est pas spécifiée dans la représentation d'où un appariement correct entre les variantes de surface et la représentation. La dernière hypothèse repose sur l'existence de mécanismes d'inférence régressive qui effectue une ré-analyse du phonème assimilé selon son contexte phonologique ce qui permet de retrouver l'identité sous-jacente du phonème. La question que l'on se pose ensuite est si l'accès au lexique est perturbé. Il n'y a pas d'activation des représentations lorsque le contexte ne permet pas l'assimilation donc le système de traitement tolère des variations phonologiques tant que le contexte est compatible/adapté aux variations. Cependant, l'hypothèse de Gow (2001) vient contredire l'explication précédente car l'assimilation est utilisée pour anticiper le phonème suivant. Les temps de réponse (TR) devraient être plus courts lorsque l'assimilation se produit c'est-à-dire lorsqu'on détecte le premier phonème à droite (TR assimilé < TR non approprié < TR non assimilé donc anticipation). Le système pourrait, avant même de traiter le premier phonème à droite, restreindre la compétition lexicale aux candidats permettant l'assimilation. Les informations apportées par le phonème assimilé permettent d'anticiper le phonème et de moduler l'activation des candidats dans la compétition lexicale, par exemple, dans la phrase

« (18) *They found ten buns in the kitchen* » (tirée de Gow Jr., 2001), une assimilation du lieu d'articulation bilabial laisse apparaître le son [m] (voir également Gow Jr., 2003).

Par ailleurs, l'assimilation peut induire une ambiguïté lexicale lorsque le phonème assimilé produit des variations dans la forme de surface qui crée un autre mot. Snoeren, Hallé et Segui (2006) montrent que l'assimilation du voisement en français est graduelle et asymétrique. L'assimilation n'est pas totale lorsqu'il existe une ambiguïté lexicale potentielle (*rate/rade*) et elle est effective lorsqu'elle donne lieu à un pseudo-mot (*robe/rope*). Les consonnes non-voisées donnent lieu à une assimilation plus importante que les voisées. Le système de traitement est moins tolérant face aux variations de surface lorsque l'assimilation provoque une ambiguïté lexicale. Un contexte sémantique peut pallier à cette intolérance. L'information contenue dans la consonne finale permet de retrouver la forme sous-jacente. Elle contient l'information sur deux positions et permet de la re-attribuer aux différents phonèmes ce qui enlève toute ambiguïté.

Les phénomènes de coarticulation donnent essentiellement lieu à des modifications dans l'organisation temporelle des traits, chaque trait restant associé à un pattern d'indices acoustiques invariants. La coarticulation artificielle engendrée dans nos expériences, par compression temporelle, va donc induire une désorganisation temporelle des traits phonétiques manipulés : plus la dégradation temporelle sera importante, plus l'identification des phonèmes sera difficile.

Le premier problème qui se pose, après la variabilité intrinsèque liée à la production de la parole, est de savoir comment ces caractéristiques articulatoires sont représentées au niveau cognitif, cette question fait toujours l'objet d'un débat. Le problème porte sur le codage des sons de parole sous la forme de leurs mouvements articulatoires, plutôt que sous la forme de traits phonétiques. La théorie motrice propose une représentation des sons de parole sous la forme de leurs gestes articulatoires. Le problème majeur est la variabilité entre les individus, elle ne facilite pas la représentation d'un son correspondant à un seul ensemble de gestes articulatoires.

1.1.4. La théorie motrice (Lieberman & Mattingly, 1985)

La théorie motrice de la perception de la parole (Lieberman & Mattingly, 1985) relie la perception auditive à la perception d'un pattern de mouvements articulatoires anticipés par l'auditeur. Elle fait référence à un décodage articulatoire de la parole. Les mouvements articulatoires de la parole seraient segmentés et stockés dans une représentation mentale des sons 1 à 1. Un code spécial permettrait de lier le geste articulatoire à la structure phonétique.

La perception nécessiterait donc de faire référence à la production de la parole. D'où l'hypothèse que la parole accélérée naturellement soit plus facile à percevoir et à reconnaître que la parole accélérée artificiellement, contrairement à ce que nous avons dit précédemment. Cependant, si la parole synthétisée contient suffisamment d'informations phonétiques, elle sera considérée, par l'auditeur, comme de la parole naturelle. De même, Fowler (1986, 1996) présente sa théorie de la perception directe de la parole qui repose sur les mêmes principes de base de la théorie motrice.

Au contraire, Ohala (1996) avance des preuves phonétiques et phonologiques contre la théorie motrice en disant que nous avons la capacité de discriminer des sons avant de pouvoir produire ces contrastes. Les représentations phonétiques doivent être établies avant que nous puissions produire les sons. La perception de la parole ne s'effectue pas directement à partir des représentations des gestes articulatoires. Les sons de parole sont donc stockés sous leur forme phonétique, une catégorisation est nécessaire, mais les gestes articulatoires ne sont pas stockés. Les mouvements articulatoires seraient stockés au niveau des représentations lexicales du fait qu'ils font partie intégrante du message linguistique. La parole synthétisée ne serait donc pas perçue comme de la parole naturelle car elle ne correspond pas aux représentations phonétiques.

Plus récemment, Liberman et Whalen (2000) confrontent ces deux théories majeures de la production et de la perception de la parole. Les auteurs sont en faveur de la théorie motrice pour expliquer les mécanismes de la perception de la parole. Les éléments phonétiques de la parole, pour eux, ne sont pas les phonèmes, mais les gestes articulatoires qui sont générés. Cependant, la théorie motrice soulève toujours plusieurs questions. La première est qu'elle suppose un module cérébral capable de convertir le signal en gestes, ce qui implique que l'on ne peut pas comprendre la parole si on ne peut pas la produire. Et pourtant, l'enfant muet de naissance qui comprend la parole peut être pris comme contre exemple. Par conséquent, l'hypothèse d'un module cérébral inné est proposée. L'imitation phonétique apparaît récemment comme une origine possible de l'apparition et de l'évolution du système des sons de parole. De plus, ce phénomène de mimétisme est relié au niveau cérébral à la présence de neurones miroirs impliqués dans la production, la perception et l'acquisition de la parole (Studdert-Kennedy, 2002). La seconde objection repose sur le fait que le modèle inverse n'a pas été démontré c'est-à-dire comment la représentation des gestes articulatoires est transformée en sons. La troisième objection porte sur la variabilité importante du système articulatoire ce qui ne facilite pas les représentations un à un.

Pour conclure, la théorie motrice ne permet pas d'expliquer la représentation des sons de la parole. De plus, la variabilité du système articulatoire entre les individus va donc engendrer d'importants problèmes pour l'identification des sons de la parole. La variation de production entre les locuteurs ne va pas permettre de mettre en correspondance un geste articulatoire et un son de la parole. D'autres théories, comme la théorie des exemplaires, ont une vision différente de la représentation des sons de parole. La théorie des exemplaires, elle, émet l'idée que chaque exemplaire correspond à un morceau de la langue, stocké en mémoire avec tous les détails spécifiques aux circonstances particulières au moment où il a été produit ou rencontré (Nguyen, Wauquier-Gravelines, & Tuller, à paraître).

1.1.5. La théorie Hypo- et Hyper-articulation (Lindblom, 1990)

La théorie d'hypo- et hyper-correction de Lindblom (1990) explique les relations entre les mécanismes de production et de perception de la parole. Elle met en évidence l'adaptation de la qualité de production du locuteur selon les capacités de perception de l'auditeur ou des autres informations qui lui sont fournies. Dans le cas où une autre modalité intervient dans la discussion, pouvant aider à la compréhension du message, le locuteur va être dans une situation d'hypo-articulation. Au contraire, dans une situation difficile de perception, par exemple dans le bruit, le locuteur va hyper-articuler le signal de parole. Ce degré d'articulation va dépendre également du contenu du message (apprentissage d'une nouvelle langue par rapport à un simple « bonjour »). Le rôle du locuteur est important car il va adapter sa production à la compréhension de l'auditeur et à la pertinence de l'information véhiculée. Un principe d'économie de la production des sons de parole va conduire à une hypo-articulation alors que plus l'amplitude et la durée des gestes articulatoires sont grandes, plus la production du locuteur est proche de l'hyper-articulation. L'hypo-articulation naît du phénomène de coarticulation ce qui va rendre imprécis les gestes articulatoires. En ce qui concerne la catégorisation, les prototypes correspondraient à une forme hyper-articulée qui maximisent la distinctivité entre les catégories phonémiques.

Nous venons de présenter les principaux problèmes liées à la perception des sons de la parole et les différentes sources de variabilité de cette production de la parole, notamment la coarticulation. Nous allons à présent décrire brièvement les bases acoustiques et articulatoires de la production des sons de parole.

1.2. La production des sons de parole :

Quelques généralités

1.2.1. La théorie source-filtre

L'une des principales origines de la variabilité, nous l'avons déjà mentionné est la réalisation à l'infini des sons de parole. La production des sons de parole peut être modélisée selon la théorie source-filtre. Cette théorie consiste à mettre à dire que la source des sons de la parole provient du souffle pulmonaire qui fait entrer en vibrations les cordes vocales (CV) et le filtre est représenté par les cavités supra-glottiques qui jouent un rôle d'amplificateur de certaines fréquences.

La théorie source-filtre permet donc de décrire les mécanismes et les propriétés de production des sons. La source correspond donc à la vibration des CV qui varie en fonction des individus et le filtre représente la façon dont la source sera modifiée par la forme des différentes cavités du tractus vocal c'est-à-dire la façon dont l'onde sonore va entrer en résonance. L'air va passer dans le tractus vocal qui va avoir un rôle important de résonateur. Le tractus vocal qui se situe au dessus du larynx peut subir des variations de forme par les mouvements de la langue, des lèvres et des mâchoires. On dénombre 4 cavités vocales : la cavité buccale, la cavité pharyngale, la cavité nasale et la cavité labiale. Chacune de ces 4 cavités correspond à des résonateurs distincts qui vont avoir un rôle d'amplificateur de l'onde sonore qui les traverse. Lorsque l'on modifie le nombre, la forme et le volume d'un résonateur, on modifie le son produit.

Les cavités supra-glottiques possèdent leur propre fréquence de résonance ce qui va modifier le son, on dit que le son est filtré. Le tractus vocal se comporte comme un filtre complexe qui conduit à un phénomène de résonance à certaines fréquences. Certaines fréquences vont être amplifiées alors que l'amplitude diminue pour toutes les autres fréquences. Les cavités correspondent donc chaque à un filtre qui possède leur propre fréquence de résonance. Le phénomène de résonance est à l'origine de l'apparition des formants qui constituent les voyelles. Les voyelles sont des sons périodiques pour lesquels l'air passe librement, il n'y a pas d'obstacle et pas de constriction. De plus, toutes les voyelles sont voisées du fait de la vibration des cordes vocales. Le signal physique d'une voyelle est caractérisé par des bandes de fréquences qui sont renforcées (la résonance), appelées des formants. Les formants correspondent à une concentration importante d'énergie à une fréquence particulière. Les formants permettent de discriminer les voyelles qui ont la même

fréquence fondamentale, la même amplitude et la même durée. La connaissance des principales caractéristiques acoustiques c'est-à-dire la fréquence et l'amplitude des deux (ou trois) premiers formants permettent d'identifier les voyelles orales. Strange (1989) fait une description des caractéristiques acoustiques des voyelles. Au niveau perceptif, seuls les deux (ou trois) premiers formants constituent l'information de base pour reconnaître une voyelle. Les deux dimensions articulatoires des voyelles : l'aperture et le lieu d'articulation se superposent à deux dimensions acoustiques (F1 et F2). Les deux premiers formants sont reliés à deux traits distinctifs des voyelles. Ces deux premiers formants correspondent aux indices les plus importants pour identifier la parole, au niveau des voyelles et de certaines consonnes (comme les occlusives). Le premier formant (F1) est lié à l'aperture des voyelles, par exemple, [i] est une voyelle fermée (valeur de F1 basse) (Figure 3). Le second formant (F2) correspond au lieu d'articulation de la voyelle, par exemple, [i] est une voyelle antérieure (valeur de F2 élevée).

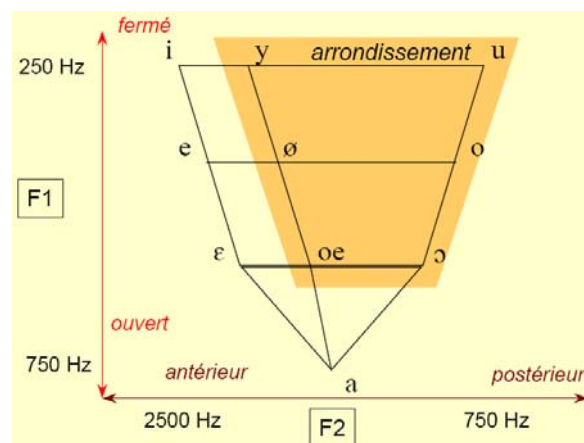


Figure 3 : Correspondance entre les dimensions articulatoires (l'aperture et le lieu d'articulation) et acoustiques (F1 et F2) des voyelles en français.

Lehiste et Peterson (1961) décrivent trois phases à la structure formantique des voyelles : la partie stable et les transitions formantiques initiale et finale. Dans une structure CVC, la transition initiale correspond au relâchement de la consonne au début de la syllabe et la transition finale correspond à la fermeture consonantique à la fin de la syllabe. Les transitions formantiques sont des segments acoustiques importants pour l'identification des sons de parole. Nous nous intéresserons particulièrement à la transition du F2, dans une structure CV, qui correspond à un indice de lieu d'articulation de la consonne. La trajectoire de cette transition varie selon le lieu d'articulation de la consonne et de la voyelle suivante (Figure 4). La dynamique temporelle des changements fréquentiels rapides (la pente) est un événement critique dans la perception de la parole (voir section 1.3.2).

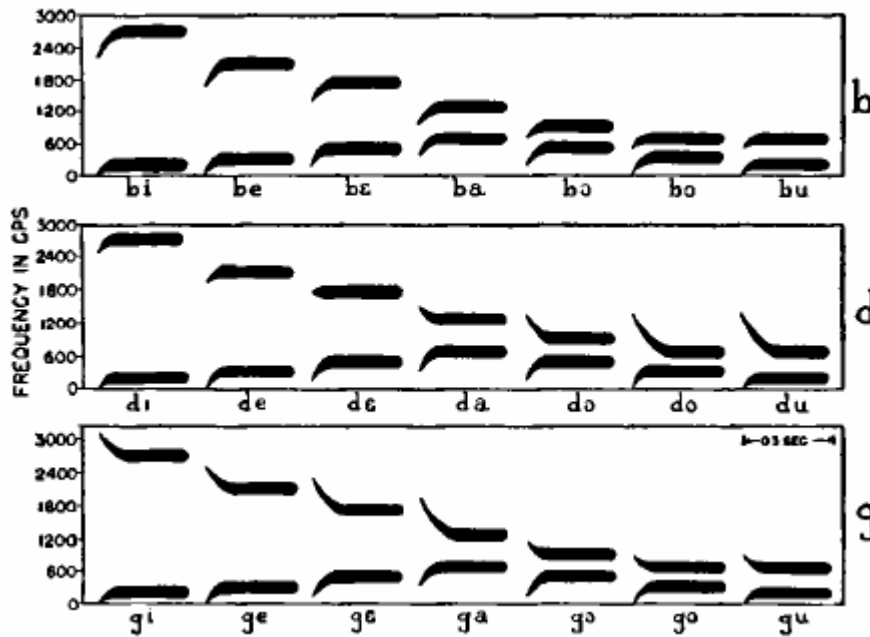


Figure 4 : Direction des transitions de F1 et F2 synthétisées pour différentes voyelles montrant les lieux d'articulation correspondant (Emprunté à Delattre, Liberman, & Cooper, 1955).

Les sons de parole varient en fonction de la disposition des organes dans le tractus vocal. Les sons sont caractérisés par trois dimensions articulatoires : (1) les organes actifs et la région où ils sont actifs, (2) le passage de l'air dans les cavités supra-glottiques et (3) la vibration ou non des CV. Les deux premiers points permettent de donner aux sons un mode et un lieu d'articulation alors que le dernier point permet de distinguer les sons voisés (sonores) des sons non voisés (sourds).

L'air arrive au niveau du larynx où se situent les cordes vocales. Les cordes vocales sont des replis musculaires situés au niveau de la glotte. La glotte est l'espace par lequel l'air s'échappe entre les cordes vocales. La glotte n'est donc pas un organe. La vitesse à laquelle s'ouvrent et se ferment les cordes vocales correspond à la fréquence fondamentale du signal (F0). Les valeurs de F0 sont différentes chez l'homme (150 Hz) et la femme (250 Hz), ainsi que chez l'enfant (350 Hz).

La sonorité ou le voisement se manifeste par la vibration périodique des cordes vocales. Les cordes vocales peuvent prendre différentes positions pour produire les sons de parole. Elles peuvent être plus ou moins resserrées : lorsqu'elles sont accolées, elles peuvent entrer en vibration et provoquer le phénomène de voisement. Le son qui est produit lorsque les cordes vocales vibrent est un son voisé ou sonore (p. ex. /a/, /v/ ou /b/). Les cordes vocales peuvent être ouvertes ce qui laisse un écoulement libre de l'air sans vibration des cordes vocales. Le

son produit est alors un son non voisé ou sourd (p. ex. /f/ ou /p/). Enfin, les cordes vocales peuvent être mi-ouvertes ce qui permet un écoulement de l'air avec du bruit. Cette position des cordes vocales correspond à la parole chuchotée. Les consonnes peuvent être non voisées (sourdes : [p t k f s ʃ]) ou voisées (sonores : [b d g m n ŋ v z ʒ l ʁ w j ɥ]). Dans cette thèse, nous nous intéresserons essentiellement aux occlusives orales voisées [b d] et non voisées [p t].

D'après Ladefoged (2001) nous pouvons résumer brièvement la description des mouvements articulatoires de la manière suivante. Il existe trois grandes catégories de sons dans les langues : les consonnes, les voyelles et les semi-voyelles ou semi-consonnes. Les consonnes se caractérisent par la formation d'un obstacle sur le passage du flux d'air dans les cavités supraglottiques alors que les voyelles sont des sons pour lesquels les articulateurs n'y font pas obstacle. Sur une échelle de constriction, nous pouvons distinguer trois niveaux : l'occlusion (entrave maximale) correspondant aux consonnes occlusives, la constriction étroite correspondant aux consonnes fricatives et la constriction ouverte donnant les approximantes et les voyelles. En ce qui concerne les semi-voyelles ou semi-consonnes, ces sons sont intermédiaires entre les consonnes et les voyelles. Du point de vue articulatoire, elles ressemblent à des voyelles mais du point de vue phonologique, elles se comportent comme des consonnes. Les voyelles et les consonnes fricatives sont fréquemment décrites comme des événements statiques alors que les occlusives sont décrites par leurs aspects dynamiques. Les consonnes sont caractérisées par l'évolution d'un spectre dans le temps excepté les fricatives qui se rapprochent des voyelles, par une stabilité spectrale.

Nous détaillerons, particulièrement, les consonnes occlusives orales [b d p t] qui composeront nos pseudo-mots dans les expériences du Chapitre 2.

1.2.2. Les occlusives

Les occlusives peuvent être orales [p t k b d g] ou nasales [m n ŋ ɲ], elles correspondent à une fermeture complète. En ce qui concerne les occlusives orales, le passage de l'air est complètement bloqué à un certain niveau du conduit vocal : deux articulateurs se touchent complètement et ferment le conduit vocal. Le mode occlusif est discontinu, contrairement au mode constrictif qui est continu, car la dynamique du spectre est variable. Le spectre d'une occlusive orale peut être caractérisé en 3 phases : la fermeture du conduit arrête l'air, la tenue de l'air (l'occlusion) provoque un silence et l'ouverture brusque au point d'articulation,

appelée communément l'explosion de la consonne (Fisher-Jørgensen, 1972). La durée de l'occlusion est brève, au maximum 100 ms (Shadle, 1997). L'explosion libère l'air accumulé dans les cavités (d'où le terme équivalent de « plosives »). Les consonnes occlusives font partie des consonnes les plus brèves dans le langage. Pendant la phase d'occlusion, le voisement est la seule source sonore possible, sinon l'occlusion est non voisée. Pendant le relâchement des occlusives, il peut y avoir plusieurs sources sonores (p. ex. voisement, friction, silence). La source sonore la plus caractéristique des occlusives est le bruit de l'explosion (ou le *burst* en anglais).

Le lieu d'articulation est caractérisé par la position de l'obstruction dans le conduit vocal (position d'un articulateur au point le plus fermé du conduit). De manière générale, pour une occlusive, on peut dire que le lieu d'articulation est l'endroit où vient se placer la langue pour obstruer le passage du canal d'air. Le lieu d'articulation est le lieu de rapprochement ou de contact entre un articulateur mobile et un articulateur fixe. Pour les voyelles on parle de zone d'articulation (orale ou nasale) et de lieu de résonance. En français, le lieu d'articulation des consonnes peut se situer aux endroits suivants : les lèvres (labiale ou bilabiale), les dents (dentale), les lèvres et les dents (labio-dentale), les alvéoles (alvéolaire), le palais (palatale), la voile du palais (vélaire), la luette (uvulaire). Dans nos expériences, nous nous focaliserons principalement sur les occlusives orales bilabiales [b p] et alvéolaires [d t].

Nous venons de vous présenter les caractéristiques articulatoires et acoustiques des sons de la parole en français. Nous avons insisté sur la description des quatre occlusives orales [b d p t] qui seront les constituants de nos stimuli (cf. Chapitre 2). Dans la prochaine partie, nous allons aborder la description d'indices acoustiques liés à des traits phonétiques permettant de distinguer deux phonèmes selon le voisement et le lieu d'articulation.

1.3. Les traits phonétiques

Dans la plupart des modèles de reconnaissance des mots parlés, la représentation infra-lexicale peut prendre différentes formes d'unités linguistiques : le phonème, la syllabe et le trait, en particulier. Rappelons brièvement qu'un phonème est défini comme la plus petite unité distinctive, non significative. Il sert à créer des oppositions distinctives entre les mots, des différences de sens. En français, par exemple, la paire minimale [p]-[b] est mise en jeu dans une opposition distinctive : /pain/-/bain/, le changement d'un seul phonème entraîne un changement de sens, dans un même contexte. De même, deux sons ne se distinguent pas par une variation de leur longueur vocalique en français, par contre, la longueur vocalique en finnois permet de distinguer deux phonèmes différents. Quant à la syllabe, elle est construite à partir de plusieurs phonèmes associés selon des règles. En français, nous sommes dans un système rythmique syllabique consonne-voyelle-consonne-voyelle. La syllabe est l'unité linguistique constituée au minimum d'une voyelle, en français ou d'une voyelle et d'une consonne, en anglais (Lieberman, Ingemann, Lisker, Delattre, & Cooper, 1959 ; voir toutefois Taft, 1979 pour une discussion). La structure de la syllabe comporte une attaque et une rime. La rime est elle-même formée d'un noyau et d'une coda (Figure 5). L'attaque comprend la (ou les) consonne(s) précédant le noyau. Le noyau est le point le plus proéminent de la syllabe. Il correspond généralement à une voyelle. La coda comprend la (ou les) consonne(s) suivant le noyau.

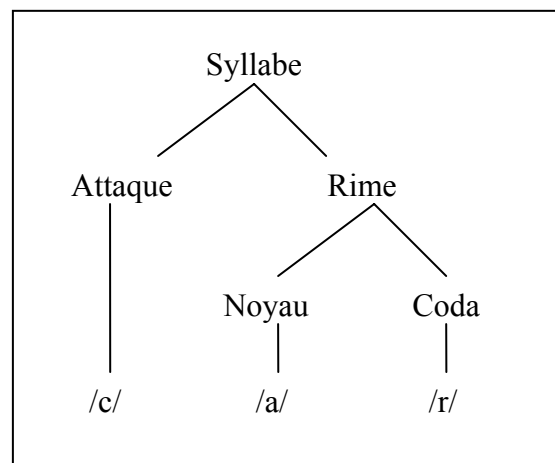


Figure 5 : Représentation structurale de la syllabe.

Les traits correspondent à une dimension phonétique servant à opposer deux séries de phonèmes (p. ex. voisé/non voisé, continu/interrompu, etc.). Les phonèmes sont constitués de

traits distinctifs binaires qui prennent une valeur négative ou positive. Les traits distinctifs acoustiques correspondent aux traits articulatoires pour décrire la production de la parole. Trubetzkoy (1939) postule que le phonème n'est plus uniquement une unité phonétique distinctive mais est composé d'un faisceau de traits acoustiques.

Selon Jakobson, Fant et Halle (1952), un phonème est une combinaison de traits distinctifs plus élémentaires. Une douzaine de traits binaires ont été observés, dans une visée universelle, afin de pouvoir décrire tous les sons de toutes les langues. Ce système phonétique universel a finalement été abandonné pour tenter de trouver des indices acoustiques fiables. Notamment, les indices acoustiques les plus étudiés sont les formants des voyelles. Pour les consonnes, le bruit d'explosion, les transitions formantiques et le voisement sont des indices acoustiques pertinents pour les discriminer.

L'importance des indices acoustiques dans la reconnaissance de la parole n'est plus à démontrer (Kent & Moll, 1969 ; Lisker & Abramson, 1967 ; Serniclaes, 1987). Les signaux de parole sont construits à partir d'une combinaison complexe d'un grand nombre d'indices acoustiques. Leur redondance permet de percevoir le signal même quand ce dernier est détérioré grâce à un effet de substitution entre les indices. Par exemple, en français, les transitions formantiques, l'intensité de l'explosion, la valeur de F0 en début de voisement et la durée de la voyelle qui précède sont des indices acoustiques redondants qui peuvent contribuer à la distinction de voisement (Snoeren, Hallé, & Segui, 2006). Cependant, tous les indices n'ont pas la même importance dans l'identification de la parole. La détérioration de l'un des indices pourra impliquer plus de perte d'intelligibilité que l'altération d'un autre. Par conséquent, une étude précise de ces segments acoustiques est nécessaire afin d'identifier les indices acoustiques les plus pertinents dans l'intelligibilité de la parole. Delattre (1958) a fait une liste de tous les indices acoustiques du français. De nombreuses études ont démontré l'importance de segments spécifiques de la parole dans l'identification des phonèmes. Delattre, Liberman et Cooper (1955) ont été les premiers à montrer que la transition du second formant pouvait servir d'indice acoustique pour identifier une consonne occlusive et que cette transition était reliée au lieu d'articulation. En effet, la transition du second formant reflète les changements de taille de la cavité et de forme causés par les mouvements des articulateurs. Cette transition du second formant représenterait les mouvements articulatoires du lieu de production de la consonne à la position de la voyelle suivante. Lisker et Abramson (1964) découvrent un nouvel indice acoustique caractérisant le voisement des occlusives en position initiale, le *Voice Onset Time* (VOT).

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à deux traits phonétiques : le voisement et le lieu d'articulation. Les deux traits phonétiques permettent de discriminer les occlusives selon deux modalités : le contraste voisé/non voisé ([+ voisé] : /b/, /d/ et [- voisé] : /p/, /t/) et le contraste bilabiale/alvéolaire ([+ bilabial] : /b/, /p/ et [+ alvéolaire] : /d/, /t/). Nous allons détailler ces deux traits séparément.

1.3.1. Le Voisement

Le voisement est caractérisé par plusieurs faisceaux d'indices, pour les occlusives, l'indice principal est le VOT, en anglais. De nombreux travaux ont porté sur l'étude du VOT, appelé Délai d'Établissement du Voisement (DEV) en français, qui est défini comme l'intervalle de temps entre le début des pulsations périodiques régulières glottiques et la détente de l'occlusion supra-glottique (Lisker & Abramson, 1964). Le VOT peut-être négatif si le voisement débute avant la fin de l'occlusion, nul si la synchronisation est parfaite et positif si le voisement commence un certain temps après la fin de l'occlusion. Les consonnes aspirées ont un VOT plus long. En français, les occlusives voisées présentent une barre de voisement pendant la durée de l'occlusion, la valeur du voisement est donc négative. Ce voisement précède l'explosion de la consonne. Le voisement correspond aux oscillations périodiques de basse intensité qui précèdent l'explosion de la consonne (Snoeren, Hallé, & Segui, 2006). Alors que les occlusives non voisées montrent un VOT qui apparait avec un certain retard après l'explosion : entre 10 et 30 ms pour le français. Serniclaes (1987) rapporte des valeurs moyennes de la durée du VOT en français et en anglais (Figure 6). Niyogi et Ramesh (2003) ont démontré, en anglais, que le VOT était un bon indice temporel pour discriminer sur le plan acoustique les consonnes voisées et non voisées.

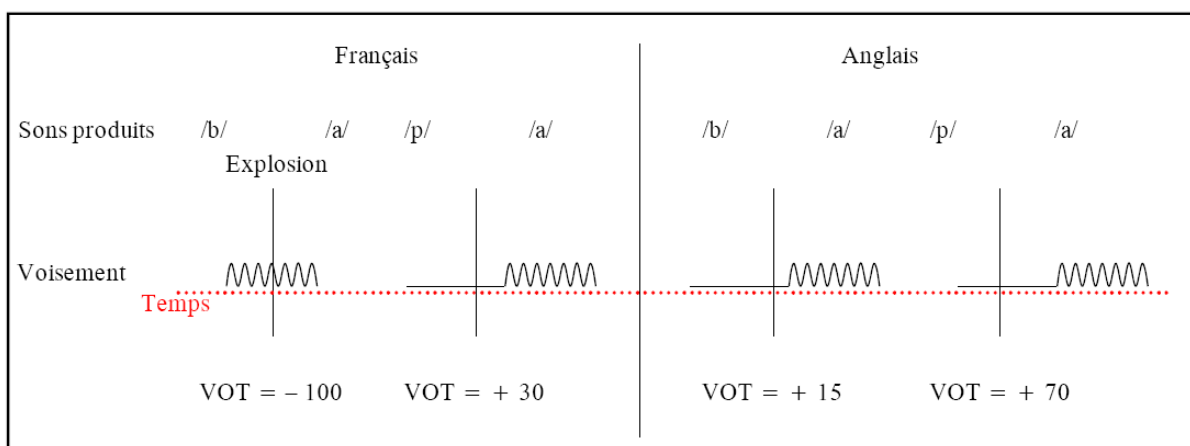


Figure 6 : VOT en français et en anglais (valeurs de VOT en ms tirées de Serniclaes (1987).

Figure tirée de la thèse de Christophe Dos Santos (2007).

1.3.2. Le lieu d'articulation

Au moment de l'explosion de l'occlusive, la résonance du conduit vocal change rapidement. Ce changement est communément appelé une transition formantique avec une voyelle après. Delattre et al. (1955) montrent que les mouvements des formants (transitions) contribuent à la perception d'un lieu d'articulation particulier d'une occlusive qui dépend de la nature de la voyelle suivante. Selon la voyelle placée derrière la consonne, la trajectoire et la durée de la transition diffèrent. Les changements rapides de la fréquence des formants sont cruciaux pour l'identification des sons de la parole. Cette transition formantique est un solide indice pour discriminer les occlusives. Une partie de la reconnaissance des consonnes est liée aux transitions phonétiques qui dépendent de l'entourage vocalique (Lefèvre, 1985). Les transitions formantiques sont à elles seules une information suffisante pour l'identification de la parole (Liénard, 1972 p. 69). En effet, lorsque par exemple, l'explosion de la consonne est coupée, la seule présence de la transition formantique suffit pour rappeler le lieu d'articulation d'une consonne, même si le mode n'est pas forcément le bon (p. ex. « say » devient « day »). De même, si l'on insert un silence entre l'explosion et la transition, une consonne supplémentaire apparaît (p. ex. « say » devient « stay ») (Tuller, Case, Ding, & Kelso, 1994). Cependant, la pente de la transition joue un rôle important dans l'identification de la parole. La Figure 7 présente les différents indices impliqués dans l'identification de la syllabe. En haut, pour l'occlusive /t/ avec la voyelle /è/ (ai), la transition du F2 est droite donc le bruit d'explosion (B) de la consonne va contrôler la discrimination. En bas, au contraire, c'est la transition du F2 qui contrôle l'identification pour l'occlusive /p/.

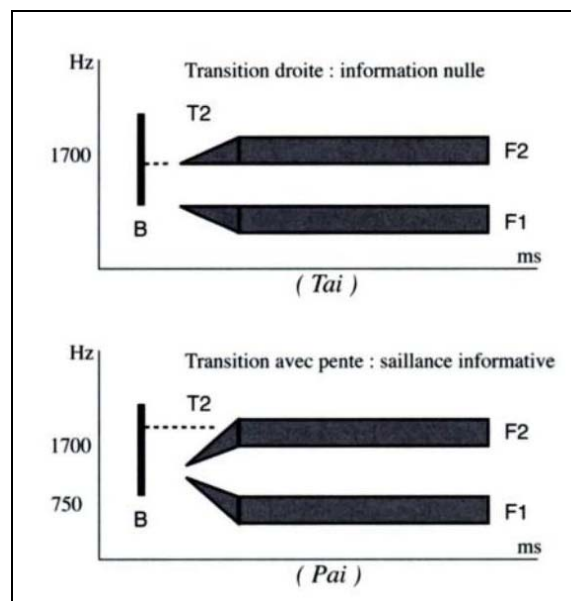


Figure 7 : Schéma montrant l'importance de la transition du F2 pour la discrimination des consonnes (tiré de Virole & Cosnier, 2004).

Cette transition formantique est différente selon le lieu d'articulation de la consonne et varie également selon le contexte vocalique. Delattre et al. (1955) décrivent, pour chaque consonne, un point auquel les transitions des formants se rejoignent. Ainsi, les variations du second formant correspondraient aux mouvements fréquentiels à partir de ce locus acoustique jusqu'à l'état stable de la voyelle. Delattre et al. (1955) cherchent également à savoir si le début de la transition se fait au niveau du locus ou bien si la transition tend vers ce point fixe. Pour cela, ils vont créer un intervalle de silence de durée variable entre le locus et le début de la transition. Les résultats montrent que la transition ne peut démarrer au locus mais les consonnes ayant le même lieu d'articulation auront le même locus pour le second formant. Le locus correspond donc à un invariant acoustique qui définit le lieu d'articulation de la consonne. Pour Delattre, la transition du second formant est donc un indice fiable pour discriminer les lieux d'articulation. La durée des transitions de F2, pour les occlusives, est en moyenne de 50 ms (Delattre, 1966c).

Dans cette partie, nous avons donc décrit deux indices acoustiques (le VOT et la transition du F2) qui feront l'objet de nos expériences. Nous manipulerons temporellement les traits de voisement et de lieu d'articulation de consonnes occlusives afin d'étudier les effets sur l'intelligibilité de la parole. La modification temporelle sur les indices acoustiques va mener à des erreurs de catégories phonétiques si les contrastes sont mal perçus ou si les mécanismes de réparation sont inefficaces.

Nous sommes donc capables de gérer cette variabilité, nous verrons comment nous gérons la variabilité produite par la compression temporelle d'indices acoustiques dans le signal de parole. Nous étudierons donc ces indices qui permettent la segmentation du signal de parole en unités distinctives : les phonèmes. Les phonèmes sont composés de traits distinctifs qui permettent de créer des catégories phonétiques différant d'un trait seulement. Les signaux de parole sont stockés dans des représentations linguistiques cognitives. Nous allons présenter les principaux modèles de reconnaissance des mots parlés qui expliquent comment les représentations cognitives sont créées. Les différents modèles se sont succédés et développés, allant des modèles unimodaux aux modèles polymodaux et également des modèles sériels à des modèles connexionnistes.

1.4. Les modèles psycholinguistiques de reconnaissance des mots parlés

Plusieurs étapes de traitement sont nécessaires avant d'arriver à une représentation linguistique d'un signal de parole. La reconnaissance des mots est une étape clé pour la compréhension de la parole. Le modèle classique de reconnaissance de la parole met en jeu plusieurs niveaux : le niveau acoustique où les indices acoustiques, les traits articulatoires sont traités, le niveau phonémique où l'addition des traits acoustiques forment le phonème, le niveau phonologique qui correspond à la représentation abstraite des phones (phonèmes), le niveau lexical où l'association des phonèmes forment des mots qui sont organisés dans le lexique, puis les niveaux syntaxique et morphologique participent à la compréhension de la parole (Figure 8).

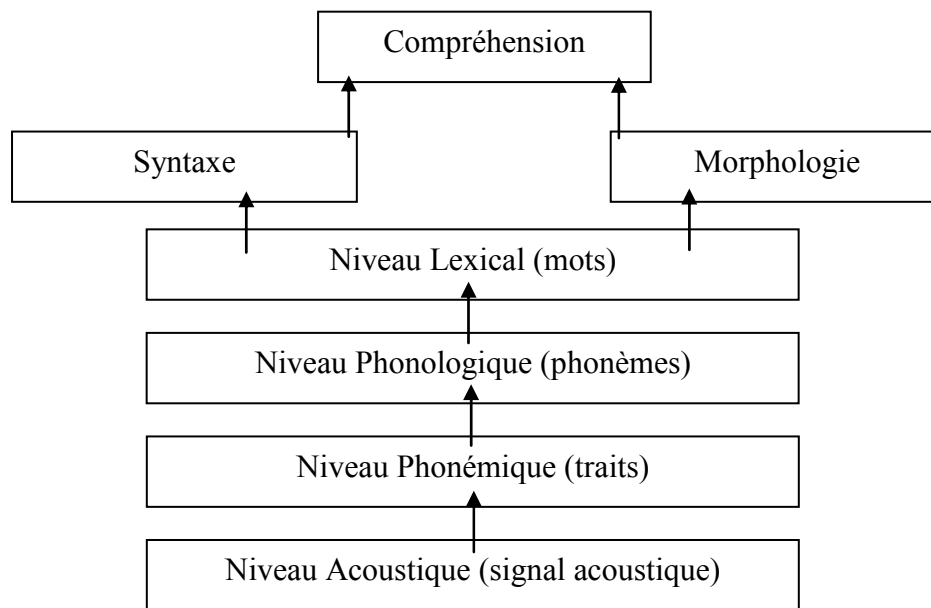


Figure 8 : Schéma des différents niveaux représentés dans la vision classique de reconnaissance des mots parlés.

Le lexique mental permet d'apparier la forme sonore du mot c'est-à-dire le niveau infra-lexical ou acoustico-phonétique et le niveau lexical correspondant au sens du mot. Le percept auditif est transformé en percept linguistique via des représentations linguistiques abstraites phonologiques qui représentent les mots dans le lexique mental. La perception est également influencée par les connaissances *a priori* du sujet. Cette influence est due à un rétrocontrôle (ou *feed-back*) des niveaux supérieurs de traitements (lexique, sémantique) vers le niveau inférieur de décodage en phonèmes.

Selon les modèles d'activation directe (Marslen-Wilson & Welsh, 1978 ; Morton, 1969), la représentation infra-lexicale est comparée simultanément à toutes les entrées lexicales. Au contraire, dans le modèle de recherche lexicale sérielle (Forster, 1976), les entrées lexicales sont examinées l'une après l'autre. La majorité des modèles de reconnaissance des mots parlés (p. ex. Cohorte, TRACE, ShortList) sont des modèles localistes, en opposition aux modèles distribués. Nous nous limiterons à décrire ces modèles localistes, en raison de leur homogénéité et de leur usage très répandu.

1.4.1. Le modèle logogène (Morton, 1969)

Le modèle de Morton (1969) rend compte d'une identification du mot qui est directe, simultanée et qui s'effectue en parallèle, contrairement à la recherche sérielle (Forster, 1976). Le modèle repose sur l'activation d'un « logogène » (venant de « logos » qui signifie « mot » et « genus » qui signifie « naissance »), chaque mot correspond à un logogène qui combine les aspects phonétiques, syntaxiques et sémantiques. L'identification du mot s'effectue lorsque la somme des informations provenant des différentes sources (visuelles, auditives) atteint un seuil critique d'activation. Le seuil est d'autant plus bas que le mot a une fréquence d'occurrence élevée dans la langue. L'usage d'informations est aussi bien ascendant que descendant mais, peu d'informations sont données sur l'intégration de l'information au cours du temps.

1.4.2. Le modèle de la « Cohorte » (Marslen-Wilson & Welsh, 1978)

Dans les années quatre-vingt sont apparus des modèles spécifiques de reconnaissance des mots parlés, qui prennent en compte le fait que l'information acoustique arrive à l'oreille de façon séquentielle et peut commencer à être traitée avant que l'ensemble du mot ait été entendu. Ce modèle met donc l'accent sur le déroulement temporel de l'accès au lexique et est une description qualitative de reconnaissance des mots. Le modèle de la « Cohorte » (Marslen-Wilson, 1984 ; Marslen-Wilson & Tyler, 1980 ; Marslen-Wilson & Welsh, 1978) propose que les premiers sons du mot activent l'ensemble des mots commençant par ces phonèmes, et que la « cohorte » ainsi constituée est graduellement réduite à mesure que les phonèmes sont identifiés, jusqu'à ce qu'il ne reste qu'un candidat dans la liste. On peut ainsi concevoir l'identification d'un mot comme un processus nécessitant trois phases : le contact initial, qui détermine la cohorte initiale ; la sélection, qui élimine graduellement les candidats non retenus ; et la reconnaissance proprement dite, qui identifie le candidat unique compatible

avec la séquence phonologique entendue : c'est le point de reconnaissance (Frauenfelder & Tyler, 1987). Dans ce modèle, certains mots peuvent être identifiés avant que tous leurs phonèmes aient été entendus, du moment que tous les autres candidats ont été éliminés. Le point de reconnaissance du candidat unique doit coïncider avec le point d'unicité du mot. Les informations sémantiques et syntaxiques permettent, en plus, d'éliminer des candidats potentiels et de reconnaître le mot avant même le point d'unicité. Ce modèle est purement séquentiel, dans le sens où le traitement se fait uniquement depuis les niveaux inférieurs de traitement (traitement acoustique) vers les niveaux supérieurs (traitement sémantique).

Par ailleurs, trois inconvénients apparaissent dans ce modèle. Le premier inconvénient est que le début du mot dans ce modèle est un point important mais la définition du début du mot autrement que par la reconnaissance du mot précédent paraît difficile. De plus, le début d'un mot n'est pas un élément robuste dans le bruit et dans la parole continue. Le second inconvénient est que le système ne permet pas de revenir en arrière, il n'a pas droit à l'erreur. Le troisième inconvénient porte sur l'absence de mécanismes tenant compte de la fréquence d'usage du mot. Une version plus récente de la Cohorte (Marslen-Wilson, 1987 ; Marslen-Wilson & Zwitserlood, 1989) a permis de réviser trois points majeurs : le phénomène de « tout ou rien » du au fait de l'impossibilité de retour en arrière, l'importance du début du mot et l'effet de contexte. Pour ce dernier point, l'effet de contexte peut exercer un effet sur le traitement de bas en haut à différents niveaux, ce qui permet de dire que c'est un modèle interactif.

1.4.3. Le modèle de recherche sérielle (Forster, 1976)

Au contraire, le modèle de recherche sérielle (Forster, 1976) est dit autonome car la reconnaissance lexicale ne tient pas compte des informations des niveaux supérieurs. Le modèle de Forster consiste à chercher la correspondance entre le stimulus et les différentes entrées stockées dans le lexique à partir d'informations visuelles. L'entrée dans le « dictionnaire mental » donne accès à toutes les informations liées au mot. Ces informations sont organisées sous forme d'un système de fichiers. Un fichier central contenant l'ensemble des informations lexicales et trois fichiers permettant l'accès au lexique central : un fichier d'accès orthographique (lecture), un fichier d'accès phonologique (parole) et un fichier d'accès sémantique et syntaxique (production du langage). Les mots sont classés selon leur fréquence, du plus fréquent au moins fréquent. Une recherche sérielle s'effectue alors à partir du traitement visuel du mot afin de trouver l'entrée orthographique correspondant au stimulus

et accéder au lexique mental où les informations lexicales correspondant au mot seront récupérées.

1.4.4. Le modèle TRACE (McClelland & Elman, 1986)

Le modèle connexionniste TRACE (McClelland & Elman, 1986) est un modèle quantitatif de reconnaissance des mots. Il comporte des sous-systèmes qui sont traités en parallèle. Ce modèle comporte trois niveaux distincts : les traits distinctifs, les phonèmes et les mots. Les informations acoustiques activent les traits distinctifs correspondants, qui activent eux-mêmes les phonèmes comportant ces traits, et ceux-ci activent les mots formés des mêmes phonèmes (entrées lexicales) dans l'ordre approprié (Figure 9). Ce traitement se fait de façon automatique et immédiate au fur et à mesure que les informations acoustiques sont traitées. Chaque niveau de traitement (traits distinctifs, phonèmes, mots) sont reliés par des connexions excitatrices au niveau immédiatement supérieur et inférieur, et les nœuds d'un même niveau sont mutuellement inhibiteurs. Chaque niveau est représenté par des nœuds où s'effectue la somme des activations provenant des autres nœuds et où cette somme est comparée à un seuil. La sélection est rendue possible par des liens d'inhibition entre unités concurrentes : l'unité la plus active inhibe les unités moins actives. Le mot le plus actif est celui qui est le plus compatible avec les données acoustiques.

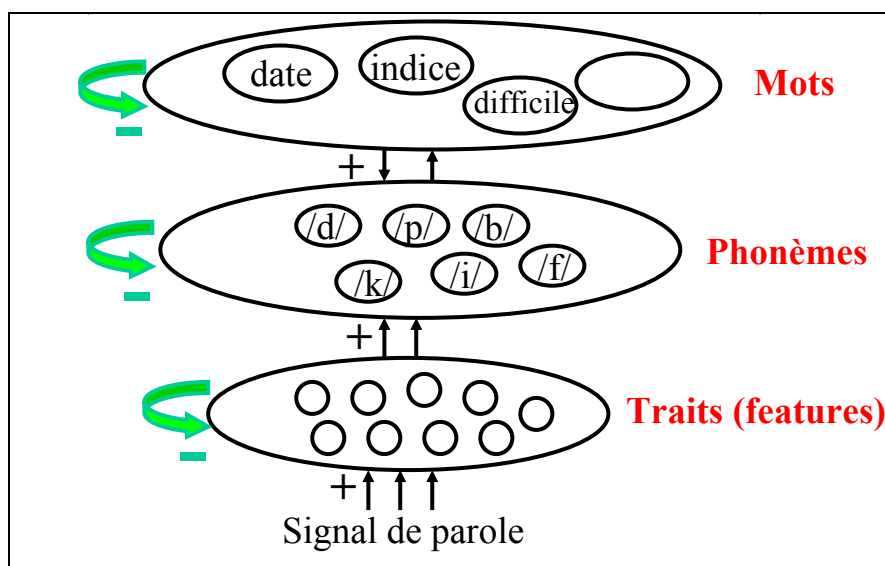


Figure 9: Modèle interactif TRACE (McClelland & Elman, 1986).

Le modèle TRACE est interactif, il propose une communication ascendante et descendante entre toutes les couches simultanément (*bottom-up* et *top-down*) : le traitement lexical peut influencer le traitement phonétique (*feedback*), ce qui fut très controversé. L'avantage de ce modèle par rapport au modèle de la Cohorte est qu'il permet de corriger des

erreurs locales. Les structures de haut niveau vont influencer l'analyse perceptive initiale. Une autre version utilisant de la parole synthétisée a été proposée par Elman et McClelland (1986).

Ce dernier modèle connexionniste de reconnaissance auditive de la parole met en évidence l'importance des structures segmentales du signal de parole et donc des traits distinctifs qui le composent. Lorsque le signal de parole est émis, il vient activer les unités « traits ». L'unité relative au trait « voisé », par exemple, s'activera à la présence de voisement dans le signal. Ce niveau activera à son tour tous les phonèmes voisés contenu dans les unités phonétiques. De la même manière, les phonèmes dont le niveau d'activation dépasse le seuil de repos vont activer les mots qui les contiennent.

D'où l'intérêt d'étudier cette perception auditive dans des conditions les plus écologiques possibles afin de coller au plus près avec la réalité des processus cognitifs impliqués dans la perception et la compréhension de la parole. En effet, la plupart du temps, le signal de parole subit de nombreuses modulations lors de son émission, de sa propagation et de sa perception.

1.4.5. Le modèle Shortlist (Norris, 1994)

Le modèle de Norris (1994) est un modèle continu autonome qui se différencie du modèle TRACE sur trois points. Premièrement, il n'existe pas d'influence des niveaux supérieurs sur les niveaux inférieurs. Deuxièmement, l'activation se propage uniquement du niveau « phonème » au niveau « mot ». Troisièmement, il existe des connexions bidirectionnelles (inhibition et excitation) à l'intérieur des nœuds mais pas entre les niveaux adjacents. Dans le modèle Shortlist, les informations *bottom-up* déterminent un ensemble de mots candidats mais les compétitions se déroulent uniquement entre des listes restreintes de mots candidats.

1.4.6. Conclusion

Les différents modèles de reconnaissance des mots présentés dans cette partie se distinguent par deux points importants : leur accès direct ou non au lexique et leur spécificité au traitement des mots parlés. Le modèle de comparaison sérielle de Forster (1976) ne permet pas un accès direct au lexique, une représentation complète du stimulus est construite. Alors que les autres modèles présentés ont tous un accès direct au lexique (Marslen-Wilson, 1987 ; McClelland & Elman, 1986 ; Morton, 1969 ; Norris, 1994). Par ailleurs, le modèle de Forster et celui de Morton sont amodaux, c'est à dire proposé aussi bien pour la modalité visuelle que pour la modalité auditive. Alors que les autres modèles ont été développés spécialement pour la modalité auditive (Cohorte, TRACE, ShortList).

Le signal de parole est assez robuste face à aux nombreuses sources de variabilité. La multiplicité des indices acoustiques pour un même son va aider à maintenir une bonne intelligibilité du message. Nous allons voir également que si l'on touche à l'intégrité des paramètres temporels du signal de parole, la perception va en être perturbée. Des études portant sur la résistance du signal de parole dans le bruit puis inversé temporellement seront présentées comme autres exemples de perception robuste de la parole, en dehors de la compression temporelle du signal de parole que nous avons choisi d'étudier dans cette thèse.

1.5. La robustesse du signal de parole

Le signal de parole peut subir des altérations acoustiques provenant de diverses origines. De nombreuses études ont porté sur la perception de la parole dans le bruit, ou bien ayant subi des modifications spectrales, fréquentielles ou de débit. Cependant, malgré ces dégradations et grâce à la redondance des indices acoustiques du signal de parole et du contexte, l'auditeur est capable de récupérer des informations manquantes mais cela n'empêche tout de même pas quelques erreurs de perception.

Une étude a montré que même si on enlève ou on masque par du bruit des morceaux du signal de parole à intervalle régulier, le signal reste intelligible, ce qui rend compte, selon les auteurs, d'une redondance phonétique dans le signal de parole (Miller & Licklider, 1950). Le signal est redondant et peut donc être incomplet. De nombreuses expériences ont étudié la perception de la parole, dans des contextes différents de dégradation, de perturbation. L'intelligibilité de la parole est remarquablement robuste aux distorsions du signal acoustique. Par exemple, le signal de parole utilise essentiellement les fréquences comprises entre 100 et 8000 Hz, mais on peut supprimer une large partie de ces fréquences et le signal demeure compréhensible (Fletcher, 1929). C'est l'exemple quotidien de nos conversations téléphoniques où l'on perçoit un signal de parole filtré. On peut écrêter le signal, voire le discrétiser complètement (remplaçant les valeurs positives par +1 et les valeurs négatives par -1), et il demeure compréhensible (Licklider, 1946, 1950). Cela suggère que le signal de parole est très redondant au niveau acoustique, et aussi, sans doute, que le cerveau « va au delà » des données, c'est à dire qu'il interprète un signal incomplet.

L'un des arguments les plus souvent cités en ce sens est le phénomène de restauration phonémique mis en évidence par Warren (1970). Il s'agit d'une illusion dans laquelle on entend des sons de parole qui ont en fait été « enlevés » du signal et remplacés par du bruit blanc. Typiquement, les personnes décrivent entendre une phrase intacte avec un bruit superposé. Cet effet est très dépendant du contexte. Les mécanismes de substitution sont des mécanismes *top-down* par l'utilisation des connaissances lexicales et contextuelles du sujet. Mais d'autres mécanismes interviennent également car cet effet de restauration phonémique existe également pour les pseudo-mots qui par définition n'activent pas d'accès lexical. Samuel (1981) évalue également le phénomène de restauration phonémique. L'augmentation d'informations lexicales rend compte d'effets *top-down* qui facilitent la perception. La perception de la parole implique aussi bien des processus *top-down* que *bottom-up*. Les unités

infra-lexicales peuvent, en effet, influencer l'identification de la parole. Dans le cas où ces mécanismes cognitifs sont faibles, ils peuvent limiter la perception de la parole. Cette étude s'accorde avec les modèles interactifs du traitement de la parole.

Un effet facilitateur du contexte est également mis en évidence dans d'autres études. French et Steinberg (1947) observent qu'un phonème est mieux identifié dans une phrase que dans un mot isolé et dans un mot isolé que dans une syllabe isolée. Nous pouvons percevoir une phrase correctement même si seulement la moitié des phonèmes est identifiée, les auteurs parlent en termes de quantité d'informations. De même, Greenberg (1999) montre que le phonème, en isolation, est plus variable au niveau de sa prononciation que la syllabe. Par conséquent, ces résultats mettent en évidence que la perception de la parole n'est pas seulement basée sur le traitement du signal mais également qu'elle est influencée par les connaissances de la langue. La redondance lexicale facilite la reconnaissance des mots mais pas celle des pseudo-mots du fait d'une absence de représentations lexicales.

Dans le cas de notre étude, nous allons compresser le signal de parole c'est-à-dire que nous allons réduire la durée de certains segments acoustiques. Nous examinerons donc les contraintes temporelles spécifiques qui s'exercent sur ce niveau segmental. La compression temporelle implique une perte d'informations et accélère l'enchaînement des événements du signal qui les entourent. L'intelligibilité du signal de parole devrait être affectée par cette compression temporelle. Cependant, les auditeurs sont capables d'utiliser des stratégies de compensation qui consistent à remplacer les informations manquantes soit par des indices redondants présents dans le signal soit par des connaissances lexicales ce qui permettra une meilleure identification du signal de parole. Suites aux nombreuses variations que le signal de parole peut subir de manière intrinsèque ou extrinsèque, le système utiliserait des *mécanismes de normalisation* qui permettraient de compenser les variations induites par ces nombreuses situations de dégradation, comme la variabilité inter-locuteurs (pour une revue récente Johnson, 2005 ; voir également les travaux de Ladefoged & Broadbent, 1957 ; Remez, Rubin, Nygaard, & Howell, 1987). Par ailleurs, Kidd (1989) montre que les changements de débit n'affectent pas seulement le contexte immédiatement voisin mais peuvent avoir des effets sur des segments plus loin. La normalisation de ces variations nécessite des ressources cognitives ce qui est particulièrement problématique chez les personnes âgées ou ayant une perte auditive. La redondance du signal est un atout majeur pour parer à ces dégradations du signal acoustique. Les connaissances lexicales et les effets *top-down* sont des processus également

importants dans l'intelligibilité de la parole. Le signal de parole est plus résistant encore si on laisse le temps aux participants de s'adapter à la compression temporelle. Une adaptation est possible : nous nous habituons à un débit rapide de parole.

Dans le cas de la compression temporelle de la parole, la durée des indices acoustiques devient tellement courte qu'elle atteint la limite imposée par la résolution temporelle du système auditif. Nootboom (1979) observe que les temps de réponse sont plus lents, dans une tâche de décision lexicale, lorsque la parole est compressée ce qui indique qu'un effort cognitif supplémentaire est nécessaire dans la perception. L'effort cognitif supplémentaire pourrait correspondre au traitement temporel des indices acoustiques nécessaire à l'identification des mots. Les phonèmes avec des parties stables (p. ex. les voyelles et les fricatives) seront plus résistants que les phonèmes rapides ou sans partie stable. En effet, l'identification de la parole est sensible aux changements rapides du spectre : si la durée des transitions diminue, les changements de fréquence sont plus difficiles à détecter (van Wieringen & Pols, 1995).

L'analyse physique du signal acoustique de la parole et notamment des éléments qui la compose montre que nous pouvons les distinguer soit par leur dimension fréquentielle soit temporelle. De plus, nous savons que ces deux types d'information sont traités séparément par l'oreille et le cerveau (voir section 1.9). À la sortie de l'oreille, au niveau du nerf auditif, les fréquences sont séparées et l'information temporelle est fidèlement transmise. Les caractéristiques acoustiques temporelles sont particulièrement influentes dans la perception de la parole. Berry (1969) déclare : « *Auditory perception of speech per se deals mainly with the temporal management of information from the output* » (Berry, 1969 : pp. 59). La dimension temporelle et les caractéristiques acoustiques du signal de parole sont donc des paramètres importants dans la perception de la parole et leurs modifications entraînent une perte d'intelligibilité.

1.5.1. La résolution temporelle

L'importance de l'acuité temporelle dans la reconnaissance de la parole peut être facilement démontrable dans des expériences où on dégrade la structure fréquentielle sans toucher à la structure temporelle et inversement. Warren (1970, 1974) met en évidence que dans un intervalle de temps de quelques millisecondes, le participant est capable d'identifier les signaux (pas des signaux de parole) mais ils sont incapables d'en donner l'ordre de présentation. Une résolution temporelle fine serait un des facteurs favorisant une

discrimination auditive de l'ordre des stimuli. Lorenzi (1999) déclare que l'acuité temporelle est la capacité à détecter des changements d'enveloppe temporelle et non des changements de structure temporelle fine.

1.5.2. L'enveloppe temporelle

Rosen (1992) décrit l'enveloppe temporelle au sens strict comme l'ensemble des modulations d'amplitude inférieures à 50 Hz. L'enveloppe temporelle de la parole présente des modulations d'amplitude de basse fréquence. Il semblerait que les modulations d'environ 3-4 Hz semblent les plus importantes car elles correspondent au rythme syllabique (Houtgast & Steeneken, 1985). Shannon, Zeng, Kamath, Wygonski et Ekelid (1995) montrent que l'intégrité de l'enveloppe temporelle conduit à une très bonne intelligibilité de mots dans le silence en dépit de la suppression de bandes de fréquence. Drullman, Festen et Plomp (1994) notent que dans un bruit ambiant, les pics de l'enveloppe temporelle émergent du bruit et permettent d'être utilisés dans la discrimination de la parole. Les informations de l'enveloppe temporelle jouent un rôle prépondérant dans la perception de la parole. Greenberg et Arai (1998) ont montré qu'une distorsion du spectre de modulation induisait une diminution significative de la capacité à reconnaître de la parole. De même, l'intelligibilité de la parole peut être altérée par un brouillage des frontières entre les syllabes (Drullman, Festen, & Plomp, 1994). En effet, la distribution associée à la durée d'une syllabe est identique au pattern du spectre de modulation ce qui suggère que cela reflète la syllabe. Le spectre de modulation de basse fréquence (3-25 Hz) fournirait donc des informations primordiales pour segmenter le signal de parole.

Dans ce travail de thèse, nous allons nous intéresser essentiellement à cette structure temporelle de la parole. Une compression temporelle du signal de la parole sera appliquée à nos stimuli. Nous observerons les effets de cette dégradation temporelle mais nous nous attendons à ce que le signal résiste à la distorsion temporelle comme nous venons de le démontrer. Nous présenterons d'autres types de dégradation que peut subir le signal de parole afin d'avoir des éléments de comparaison à mettre en parallèle avec notre étude. C'est pour cela que nous vous présentons ci-dessous, des études de perception de la parole dans le bruit et de parole inversée temporellement.

1.5.3. La perception de la parole dans le bruit

Dans un environnement bruyant, il est possible pour un être humain de parvenir à entendre une voix parmi de nombreuses voix, donc de suivre une conversation : c'est l'effet *cocktail party* (Cherry, 1953). L'effet *cocktail party* correspond à la possibilité de détecter un flux de parole parmi plusieurs flux simultanés. Dans une scène auditive contenant plusieurs sources sonores, nous sommes capables de sélectionner un signal sonore qui nous intéresse. Il existe un effet de l'attention sur la perception de la parole. Dans la modalité visuelle, Posner (1995) a montré un effet similaire. Cette ségrégation de flux auditifs ou d'objets auditifs, selon Bregman (1990), s'effectue à l'aide de règles de rapprochement de certaines sources sonores selon certaines conditions (fréquence, durée, amplitude, proximité). Bregman (1990) considère que la constitution des flux s'effectuerait à deux niveaux. Un bas niveau correspondant aux propriétés intrinsèques des sons (fréquence, durée, amplitude) permettant selon les lois de la Gestalt de rapprocher des sources sonores (Ellis, 1974). Un plus haut niveau, spécifique au type d'information (parole ou musique) correspondant au schéma descendant et à l'influence des connaissances.

La perception de la parole dans le bruit consiste à séparer le signal acoustique pertinent du bruit. Notre système auditif sous le contrôle cérébral applique des stratégies de ségrégation qui utilisent des règles précises pour distinguer les différents flux de la scène auditive. La dégradation du signal acoustique sur la dimension temporelle est tout à fait différente. Le signal de parole n'est pas masqué, il est intrinsèquement modifié. La dynamique temporelle peut être totalement bouleversée, comme par exemple dans les expériences de parole inversée.

1.5.4. La parole inversée temporellement

Quand on interrompt ou qu'on inverse le signal dans des tranches de plusieurs dizaines de millisecondes, la compréhension peut demeurer très bonne jusqu'à un certain degré de dégradation (Miller & Licklider, 1950 ; Saberi & Perrott, 1999). Dans l'étude de Colombo et Bundy (1983), la parole naturelle est comparée avec de la parole jouée à l'envers chez des jeunes enfants. La parole à l'envers n'induit pas les mêmes traitements bien qu'elle contienne le même ensemble d'informations fréquentielles : la dynamique temporelle des stimuli de parole est donc essentielle pour que la parole soit traitée comme telle. De même, l'étude de Meunier, Cenier, Barkat et Magrin-Chagnolleau (2002) utilisant de la parole à l'envers a démontré une importance de la dynamique temporelle dans la reconnaissance de mot et de pseudo-mots par des adultes. Récemment, Grataloup (2007) a étudié l'intelligibilité de la parole inversée en prenant la syllabe comme unité de base. Elle montre que l'intelligibilité

reste bonne jusqu'à une taille d'inversion temporelle égale à une syllabe pour des mots et des pseudo-mots bisyllabiques.

L'inversion temporelle de la parole se rapproche du type de dégradation que nous avons choisi d'étudier dans cette thèse, puisque la dimension temporelle est manipulée dans les deux cas. Le signal de parole est une suite chronologique d'évènements et de segments acoustiques qui font son identité. Si ce déroulement temporel est perturbé, l'intelligibilité du signal de parole diminue. Cet enchaînement dans le temps est calqué sur les capacités de traitement temporel auditif, nous pouvons traiter et encoder une certaine quantité d'informations dans un temps donné, donc si le débit de parole change, le traitement de la parole sera moins efficace. En français, l'impression de régularité temporelle est donnée dès le niveau segmental c'est-à-dire que la distribution des sons de parole constitue un paramètre important dans la structure temporelle (Keller & Zellner, 1996).

1.6. La compression temporelle de la parole

La perception de la parole compressée a été remise au goût du jour depuis les années 1990. Les applications de la parole compressée temporellement sont multiples, notamment pour une recherche rapide d'informations pertinentes dans un long enregistrement (Janse, 2003). En 1991, un projet néerlandais a porté sur l'amélioration de l'accès aux journaux pour les personnes avec un handicap visuel. La lecture rapide des journaux par un logiciel était, selon les participants, plus intelligible que la vitesse de lecture normale. Ce projet a donc montré que l'intelligibilité de la parole était plutôt bien préservée même à des taux de compression forts. Les auditeurs préfèrent une lecture de parole plus rapide, même si elle est synthétique et de mauvaise qualité, ce qui rend compte d'une très grande résistance de la perception de la parole. Les auditeurs sont également capables de s'adapter à des taux de compression importants sur du signal synthétisé. Zemlin, Daniloff et Shriner (1968) montrent qu'une compression de moitié n'affecte pas significativement l'intelligibilité de la parole. Foulke et Sticht (1969) rapportent que des auditeurs présentant un trouble de la vision préfèrent une vitesse de lecture, par le logiciel, aux taux de compression de 35-40%.

La compression temporelle artificielle de la parole serait plus intelligible que lorsqu'on demande à un locuteur d'accélérer son débit de parole. La parole produite rapidement implique une articulation réduite c'est-à-dire une distorsion à la fois temporelle et fréquentielle ce qui diminue l'intelligibilité du signal de parole. La parole rapide reste intelligible jusqu'à une compression de presque trois fois sa durée initiale, en particulier, si on permet au sujet de s'adapter au débit rapide de la parole. Dupoux et Mehler (1990) compressent temporellement des mots, sans modification de la structure spectrale mais en modifiant les paramètres de durée. Une expérience pilote à 50% de compression a montré des performances de 100% dans une tâche d'identification du phonème initial d'un mot, utilisant des occlusives. Un facteur important dans la perception de la parole compressée est la résolution temporelle de notre système auditif. Si l'on réduit trop le signal, la résolution temporelle n'est pas assez efficace pour permettre une analyse précise du signal. Foulke (1971) suggère que l'organisation temporelle n'est pas pertinente à un débit normal de parole mais elle devient très critique pour la compréhension lorsque le taux de compression augmente.

Une partie des résultats de Dupoux et Mehler (1990) suggère que la compression temporelle affecte principalement la capacité de discrimination des sons de parole. Garvey

(1953) a également montré que des mots isolés restaient intelligibles (plus de 90%) à un taux de compression de 50% et moins. Alors que des taux de compression plus importants entraînent une diminution très rapide des performances.

La perte d'informations va induire une perte d'intelligibilité et ceci surtout sur les segments ayant une partie stable courte ou sans partie stable comme par exemple les occlusives par opposition aux voyelles ou aux fricatives. De même, pour les changements fréquentiels rapides au niveau des transitions, il a été montré que les changements de fréquence étaient plus sensiblement détectés pour des stimuli longs que pour des stimuli plus courts, à cause d'une augmentation du temps de traitement du stimulus (van Wieringen & Pols, 1995). Miller, O'Rourke et Volaitis (1997) montrent que la durée de la transition initiale (distinguant /b/ et /w/) est jugée selon le débit de prononciation. Cela veut dire que plus le stimulus est court, plus il va être difficile de détecter les changements de fréquence. En outre, quand la durée de la transition diminue, la largeur de bande du signal augmente. Ce qui peut induire une limite dans la discrimination fréquentielle d'un stimulus court ou compressé.

Le taux de compression affecte la perception des phonèmes c'est-à-dire l'information acoustique correspondant spécifiquement à un trait phonétique (Gay, 1978 ; Gottfried, Miller, & Payton, 1990 ; Lindblom, 1963 ; Miller, Green, & Reeves, 1986 ; Nootboom, 1981 ; Summerfield, 1975). Les durées des consonnes sont relativement moins réduites que la durée des voyelles (Gay, 1978 ; Max & Caruso, 1997). Les indices acoustiques pertinents dans l'identification des consonnes sont la plupart du temps des indices brefs et rapides d'où la conservation de la durée des consonnes, au détriment des voyelles qui sont constituées d'une partie stable importante. Ces effets de contexte et de débit de parole n'affectent pas seulement la partie stable des voyelles mais également les trajectoires des transitions des formants, qui sont considérées comme des indices dynamiques. Lindblom et Studdert-Kennedy (Lindblom & Studdert-Kennedy, 1967) déclarent que la perception des voyelles coarticulées est basée sur la direction et la pente des transitions formantiques. L'auditeur compense et s'adapte à la réduction de durée et aux changements de fréquences formantiques.

Nous allons voir maintenant les raisons pour lesquelles la parole accélérée naturellement par le locuteur est moins intelligible que la parole de synthèse compressée.

1.6.1. La production naturelle de la parole rapide

Pendant une conversation normale, le locuteur change considérablement son débit (Miller, Grosjean, & Lomanto, 1984). Lorsqu'un locuteur augmente son débit, la première chose qu'il fait est de réduire le nombre et la durée des pauses (Lass, 1970). Le locuteur peut accélérer

son débit articulatoire dans une certaine limite. Les limites se situent au niveau physiologique dans les mouvements d'ouverture et de fermeture des mâchoires ainsi que dans les mouvements de la langue (devant plus rapide que derrière et aussi plus de contrôle, voir Miller, Heise, & Lichten, 1951) . Il y a donc une vitesse maximale de lecture à voix haute (Greisbach, 1992). Quant à la perception de la parole, son traitement est limitée par la résolution temporelle du système auditif et à un niveau supérieur, par la quantité d'informations traitées.

Ces changements de débit de parole vont altérer la durée des propriétés acoustiques qui caractérisent les traits phonétiques à cause du phénomène de coarticulation. Les influences consonantiques sur les voyelles sont principalement dues à ce phénomène (Pickett, 1999). Comme nous l'avons dit précédemment, l'établissement des correspondances entre le signal acoustique et les représentations phonétiques dépend fortement du contexte (Lieberman & Mattingly, 1985 ; Stevens & Blumstein, 1981). Une des variations contextuelles perturbant la mise en place de ces correspondances est le débit de parole (coarticulation). La carte d'appariement entre les traits acoustiques et les catégories phonémiques va donc être modifiée. Selon le débit d'articulation, les indices acoustiques ne vont pas avoir le même poids relatif dans la distinction entre deux phonèmes et cela, même à un débit normal. Les changements de débit de la parole influencent la perception des voyelles courtes par rapport aux longues, la perception du VOT ainsi que la perception des transitions (Kessinger & Blumstein, 1998). La valeur de VOT change avec un changement de débit (Miller, Green, & Reeves, 1986 ; Summerfield, 1975, 1981). À débit lent, la durée de la syllabe augmente ainsi que la valeur de VOT, ce qui correspond, en anglais, à un dévoisement. La frontière phonétique catégorielle, le long d'une série de VOT, bascule vers des valeurs de VOT plus longues lorsque la syllabe de la série devient plus longue (Green & Miller, 1985 ; Summerfield, 1981). Au contraire, lorsque le débit s'accélère, Andruski, Blumstein et Burton (1994) n'observent pas de différence significative sur les temps de catégorisation de phonèmes pour une durée de VOT réduite de 1/3, Par contre, si la réduction du VOT est égale à 2/3, les auteurs montrent une différence significative dans les temps de catégorisation. Les processus de catégorisation sont plus lents car le nombre d'exemplaires disponibles a été réduit.

La plupart des changements de durée d'une syllabe induits par le débit est due à un changement de durée de la voyelle « noyau » (Gay, 1978). Pourtant, tout dépend de l'utilisation de cette durée pour différencier les voyelles dans les différentes langues. En anglais, Strange, Jenkins et Jonhson (1983) mettent en évidence que la variation de durée de

la voyelle affecte son identification. Même si le débit de parole n'affecte pas les fréquences des formants, relativement stables, des voyelles (Gay, 1978), il va affecter la durée des voyelles. Des études ont montré que la qualité des voyelles perçues change si l'on fait varier la durée sans modifier l'information spectrale (Verbrugge & Isenberg, 1978). En français, la durée est rarement utilisée pour différencier les voyelles (Delattre, 1959), contrairement, au finnois qui utilise la durée pour différencier des voyelles. L'organisation temporelle du signal de parole semble donc important et l'extraction des informations temporelles et leur analyse rendra compte des modifications du signal et permettra ou non sa reconnaissance. La compression temporelle de la parole va également impliquer un changement de cartographie précise entre le signal acoustique et les catégories phonétiques. Par conséquent, l'auditeur doit avoir le moyen de prendre en compte ces changements des propriétés acoustiques dus au changement de débit pour avoir une perception correcte de la parole. L'auditeur en est capable, notamment, si on lui laisse le temps de s'adapter au débit de parole. Mais le locuteur peut également adapter son débit selon la compréhension de l'auditeur : c'est la théorie de l'hypo-hyperarticulation (Lindblom, 1990).

1.6.2. Le phénomène d'adaptation

Il existe un phénomène d'adaptation à la compression temporelle de la parole (Dupoux & Green, 1997 ; Pallier, Sebastián-Gallés, Dupoux, Christophe, & Mehler, 1998). Les auditeurs semblent s'adapter à des modifications temporelles lorsque la parole est accélérée par un facteur 2 ou 3. Ce débit ne peut cependant être produit naturellement par un locuteur. Cette adaptation est, selon les auteurs, due à deux phénomènes simultanés. Le premier correspond à un ajustement à court-terme des paramètres locaux de débit de la parole. On parle d'une étape de normalisation locale lors du traitement phonétique du signal (Miller, O'Rourke, & Volaitis, 1997). Le second phénomène est un ajustement à long-terme qui reflèterait un processus d'apprentissage perceptuel plus permanent. On est dans ce cas au niveau des représentations abstraites ce qui explique que les différences entre les locuteurs ne posent pas de problème. Cette adaptation ne semble pas liée aux propriétés acoustiques du signal mais aux mécanismes linguistiques qui extraient les informations acoustiques et les appariant aux représentations lexicales (Pallier, Sebastián-Gallés, Dupoux, Christophe, & Mehler, 1998). De plus, le temps d'adaptation nécessaire dépend du taux de compression temporelle. Ce phénomène d'adaptation apparaît seulement après quelques phrases et aurait lieu à un niveau pré-lexical (niveau phonologique ou plus bas, au niveau du traitement phonétique/acoustique),

ce qui induit qu'il apparaîtrait également pour des pseudo-mots. Janse (2003) montre un phénomène d'adaptation plus marqué pour les pseudo-mots que pour les mots.

Nous avons vu que la compression temporelle touchait plus les segments de parole courts ou sans partie stable, comme les occlusives, que les segments avec des parties stables, comme les voyelles ou les fricatives. Dans la partie suivante, nous allons vous présenter rapidement une description articulatoire et acoustique des sons du français. Les consonnes occlusives feront l'objet d'une attention particulière puisqu'elles composeront nos stimuli dans nos différentes expériences.

Nous venons de voir que certains modèles étaient spécifiques à la perception auditive des mots, comme le modèle TRACE. La perception, quelle que soit la modalité dans laquelle on se place, consiste en une analyse d'un ensemble d'informations sensorielles présentes à un instant donné pour en déduire des éléments ayant du sens. Notre perception est immédiate et pourtant elle apparaît comme le résultat de nombreux processus complexes menés en parallèle ou successivement. Afin de percevoir les signaux de parole émis par un locuteur, plusieurs étapes de traitement sont nécessaires. Il est important de distinguer le phénomène de perception de la parole de celui de la compréhension de la parole, cette dernière n'étant possible qu'après la perception et qui nécessite des étapes supplémentaires. Les processus permettant la perception de la parole font intervenir plusieurs niveaux de structures. D'une part, les structures de bas niveau comme l'appareil auditif périphérique qui va réceptionner l'information sonore et commencer l'intégration du signal de parole. D'autre part, les structures de plus haut niveau comme le cortex cérébral qui va analyser et traiter les informations sensorielles provenant des niveaux inférieurs. C'est à ce stade que s'effectue la perception de la parole. Ensuite, d'autres mécanismes seront activés pour permettre la compréhension de la parole. Pour mieux comprendre comment le son est traité et comment il arrive au niveau cérébral, nous allons donc maintenant décrire le système auditif périphérique et central ainsi que les aires cérébrales impliquées dans le traitement de la parole. De plus, nous aborderons le traitement temporel et fréquentiel des sons ainsi que leur encodage le long des voies auditives ascendantes.

1.7. Le système auditif

L'apprentissage de notre langue maternelle passe en tout premier lieu par notre perception auditive. Bien avant de savoir lire, l'enfant reconnaît les mots qu'il entend. Dès les premières étapes de notre développement, nous entendons les sons de notre environnement et nous sommes capables de discriminer les sons de parole des bruits (Colombo & Bundy, 1983). Les capacités de perception catégorielle sont présentes de manière innée chez l'enfant (pour une revue voir (Eimas, Miller, & Jusczyk, 1987 ; Jusczyk, Luce, & Charles-Luce, 1994). Les enfants sont capables de faire des distinctions phonétiques, ils peuvent utiliser les traits distinctifs pour différencier deux phonèmes proches phonétiquement et ils ont donc des représentations catégorielles des phonèmes (Eimas & Miller, 1992 ; Eimas, Siqueland, Jusczyk, & Vigorito, 1971). Notons que dans le cas de la perception inter-langue, après que nous ayons créé nos représentations phonémiques et que nous ayons mis en place nos correspondances entre le signal acoustique et les représentations phonologiques, nous sommes dans l'incapacité de discriminer certains contrastes phonétiques non natifs (Nääätänen et al., 1997). Dans une revue, Jusczyk et Luce (2002) présentent des universaux dus à la structure de notre système auditif qui déterminent des propriétés de saillance perceptive des stimuli acoustiques, le système phonétique tiendra compte de ces saillances pour déterminer les traits phonologiquement distinctifs.

Notre capacité de discrimination acoustique fine est permise grâce aux spécificités de notre système auditif et à nos capacités cognitives associées. Le système auditif humain est divisé en deux parties : le système auditif périphérique et le système auditif central.

1.7.1. Le système auditif périphérique

Le système auditif périphérique comporte trois parties qui jouent chacune un rôle spécifique dans la perception du son (Figure 10) : l'oreille externe, moyenne et interne.

1.7.1.1. L'oreille externe

L'oreille externe est constituée du pavillon et du conduit auditif externe. La première étape est de capter et de localiser les sons de l'environnement grâce au pavillon. La seconde étape est assurée par le conduit auditif externe où les sons transitent et où ils sont légèrement amplifiés. L'oreille externe permet la transmission aérienne de l'onde sonore. Un son correspond à un déplacement d'air suivant une certaine intensité et une certaine fréquence. Le son va ensuite atteindre le tympan qui marque l'entrée dans l'oreille moyenne.

1.7.1.2. L'oreille moyenne

L'*oreille moyenne* est une cavité qui abrite les trois osselets (le marteau, l'enclume et l'étrier) qui vont assurer une transmission de la vibration sonore d'un milieu aérien à un milieu liquidien. Le tympan va vibrer selon la fréquence spécifique du son entendu puis, cette vibration aérienne va être transformée en vibration mécanique alternative pour être transmise à la chaîne des osselets. Les osselets ont un rôle important de levier, ils permettent d'adapter l'intensité et la vitesse du signal reçu pour transmettre les informations sonores, via la fenêtre ovale, au milieu liquidien dans l'oreille interne.

L'oreille moyenne a la capacité de limiter au besoin l'intensité des signaux sonores y transitant grâce à des muscles bridant les déplacements du marteau ainsi que ceux de l'étrier, c'est le phénomène de *réflexe stapédien* (chez l'homme seul le muscle de l'étrier, le stapédien, se contracte). Lorsqu'un son fort est détecté par la cochlée, l'information est transmise aux noyaux du tronc cérébral. Une boucle réflexe commande la contraction de ces muscles, ce qui entraîne une augmentation de la rigidité de la chaîne tympano-ossiculaire, une limitation des déplacements et donc une diminution de l'énergie transmise à l'oreille interne. L'atténuation reste cependant relativement faible (environ 10 dB, variable selon les fréquences) et intervient en quelques dizaines de millisecondes.

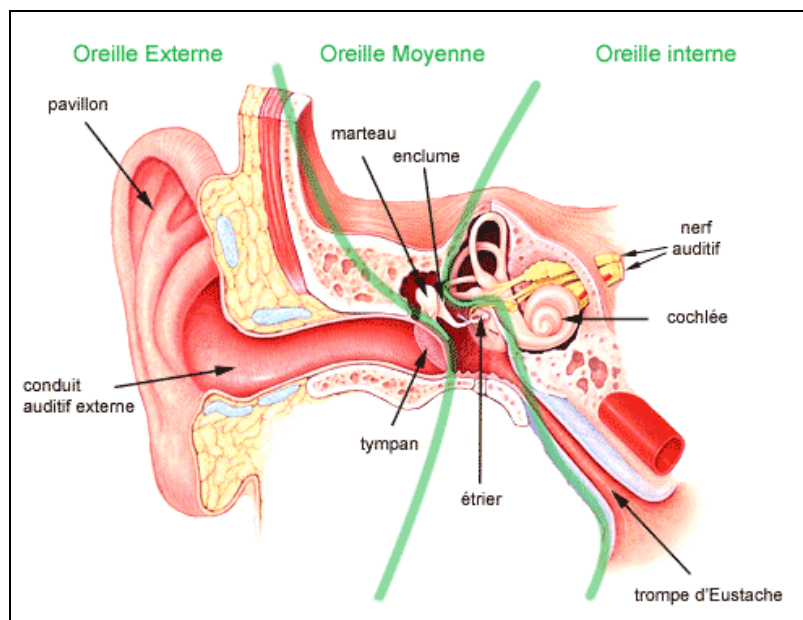


Figure 10 : Schéma du système auditif périphérique humain
(www.iframsurdite.com/thematique.html).

1.7.1.3. L'oreille interne

L'oreille interne contient l'organe de l'équilibre (l'appareil vestibulaire) et l'organe de l'ouïe, la cochlée.

La cochlée

La cochlée est divisée en trois parties : la rampe vestibulaire, la rampe tympanique et le canal cochléaire. La cochlée est un organe creux remplie de liquide, la composition chimique de ce liquide permet de distinguer deux types : la périlymphe dans les deux rampes et l'endolymphe dans le canal cochléaire. Les vibrations appliquées à la fenêtre ovale vont faire mouvoir la périlymphe, dans un premier temps, selon une certaine fréquence. Ce mouvement liquidien va être transmis à la membrane basilaire tout le long de la cochlée.

La tonotopie passive

La représentation fréquentielle des sons dans la cochlée suit une tonotopie passive. Le long de la cochlée, chaque cellule ciliée répond préférentiellement à une certaine fréquence, pour permettre au cerveau de différencier la hauteur des sons : les basses fréquences (sons graves) sont représentées à l'apex de la cochlée alors que les hautes fréquences (sons aigus) sont représentées à la base. La théorie de l'onde propagée de Békésy (1960) met en évidence des mécanismes passifs de propagation de l'onde sonore. Ces mécanismes passifs sont dus à la physiologie propre de la membrane basilaire. La base de la cochlée est plus épaisse et plus large que l'apex ce qui lui confère une rigidité plus importante. Cette rigidité joue donc un rôle primordial dans la propagation sonore le long de la cochlée. En effet, l'amplitude du mouvement de la membrane basilaire est plus importante à l'apex, pour les faibles fréquences, et diminue à la base pour les hautes fréquences. Des mécanismes actifs, via les cellules ciliées, sont également démontrés dans la propagation de l'onde sonore.

L'organe de Corti

Dans la cochlée, au niveau du canal cochléaire, se situe l'organe de Corti, l'élément sensoriel de l'audition. L'organe de Corti est composé de milliers de cellules ciliées. Il existe deux types de cellules ciliées : les cellules ciliées externes (CCE) et internes (CCI). Les cellules ciliées doivent leur nom à la présence de stéréocils à leur pôle apical, qui baignent dans l'endolymphe. Les mouvements de la membrane basilaire, à ce niveau, sont transmis à l'endolymphe qui va faire bouger les stéréocils des cellules ciliées. Les stéréocils sont le siège de la transduction mécano-électrique : les mouvements mécaniques des stéréocils sont à ce

niveau transformés en excitation électrique transmise par le nerf auditif. Les cellules ciliées situées dans la région correspondante à la fréquence du stimulus, le long de la cochlée, vont être excitées et un influx nerveux va être créé. Chaque type cellulaire (CCI et CCE) est doublement innervé c'est-à-dire que l'innervation des cellules ciliées forme une boucle véhiculant des messages vers le système nerveux central (fibres afférentes), ou en provenance du système nerveux central (fibres efférentes).

Les CCI

Les CCI font synapse avec tous les neurones de type I du ganglion spiral, formant le système afférent radial (nerf auditif) qui relie la cochlée aux noyaux cochléaires. C'est par là que partent tous les messages auditifs vers le cerveau. Les CCI ont un rôle de détection et communiquent au cerveau la présence de vibrations dans l'organe de Corti en réponse à des stimulations sonores. Le système efférent latéral issu de petits neurones de l'olive supérieure homolatérale, effectue un rétrocontrôle sur la synapse CCI/fibre afférente : il intervient notamment pour protéger cette synapse contre un accident excitotoxique (ischémie ou trauma).

Les CCE

Les CCE sont environ trois fois plus nombreuses que les CCI. Les CCE font synapse avec des terminaisons dendritiques des neurones ganglionnaires de type II, formant le système afférent spiral. Les CCE sont principalement reliées à des fibres efférentes, ces dernières sont directement innervées par les terminaisons axoniques de neurones situés bilatéralement dans le complexe olivaire supérieur médian : c'est le système efférent médian dont le rôle est de modérer l'électromotilité des CCE. En 1983, Brownell (1983) découvre l'électromotilité des CCE correspondant à la contraction des CCE, c'est un mécanisme actif qui intervient en réponse à une stimulation sonore et qui permet d'amplifier le mouvement des CCE (pour une revue voir Brownell, 1990). Le phénomène d'électromotilité unique des CCE est responsable de la capacité de la cochlée à générer des sons, les otoémissions acoustiques (Kemp, 1978). Les CCE sont impliquées dans un mécanisme de rétrocontrôle actif ayant pour fonction d'amplifier les vibrations détectées par les CCI.

La transduction mécano-électrique

Les vibrations aériennes de l'oreille moyenne sont transmises, via la fenêtre ovale, à la périlymphe à l'intérieur de la cochlée ce qui provoque des mouvements de la membrane

basilaire sur laquelle repose l'organe de Corti. Les mouvements de haut en bas de la membrane basilaire vont faire onduler les cellules ciliées de l'organe de Corti et ainsi faire bouger les stéréocils des CCE d'avant en arrière. Les CCE excitées se contractent (électromotilité) ce qui amplifie le mouvement de vibration initiale. De même, les stéréocils des CCI sont déplacés, les CCI excitées vont activer les synapses avec les fibres afférentes et un message nerveux va donc être envoyé au cerveau via le nerf auditif.

Au niveau du système auditif périphérique, des étapes importantes de traitement et d'encodage des sons de parole sont engagées. Ces informations sont ensuite acheminées jusqu'aux aires cérébrales spécialisées.

1.7.2. Le système auditif central

La réponse nerveuse produite par le système auditif périphérique va donc être véhiculée par les différents relais sous corticaux et corticaux des voies auditives ascendantes. Deux voies auditives ascendantes (afférentes) vont amener l'influx électrique de la périphérie au cerveau : une voie principale, la voie auditive primaire et une voie secondaire, la voie auditive non primaire ou réticulaire. Les fibres du nerf auditif prennent naissance au niveau de la cochlée (CCI) et se projettent sur les noyaux cochléaires dans le tronc cérébral. Au niveau du noyau cochléaire, deux faisceaux se distinguent, l'un donne la voie auditive primaire et l'autre correspond à la voie réticulaire. *La voie réticulaire* n'est pas spécifique à la fonction auditive, elle est polymodale. Elle reçoit diverses informations et permet une sélection du type d'information à traiter en priorité. Par contre, *la voie auditive primaire* est une voie spécifique à la fonction auditive qui relie la cochlée au cortex auditif primaire (Figure 11).

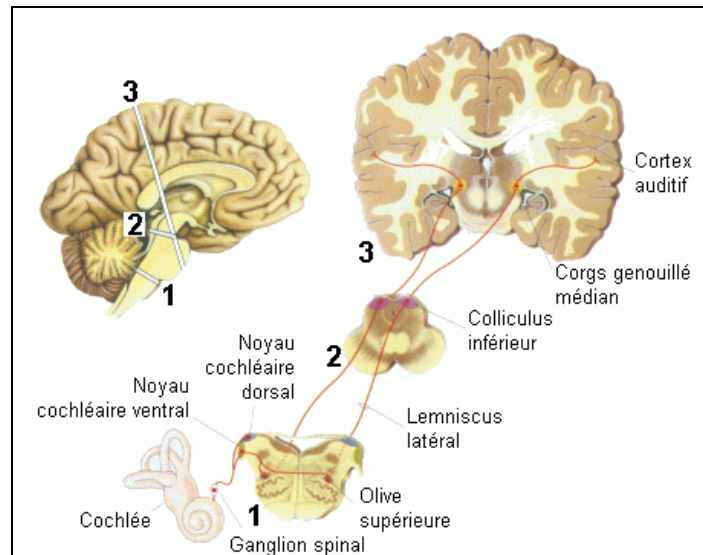


Figure 11 : Présentation schématique des voies auditives, de la cochlée jusqu'au cortex auditif primaire (adapté de Bear, Connors, & Paradiso, 1999). Les fibres auditives de chaque oreille se projettent dans le cortex gauche et dans le cortex droit.

La voie auditive primaire est courte et rapide (grosses fibres myélinisées), elle met en jeu différents relais synaptiques. Le faisceau de la voie auditive primaire va traverser la ligne médiane du bulbe rachidien. La plupart des voies sont croisées après l'étape du noyau cochléaire (NC) et se projettent sur les 3 noyaux du complexe olivaire supérieur (COS) controlatéral. L'information auditive va ensuite suivre le lemnisque latéral jusqu'au colliculus inférieur (CI), avant d'atteindre le noyau géniculé médian (NGM) du thalamus auditif. Les projections vont se terminer dans l'aire auditive primaire. L'information auditive pertinente arrive dans la première zone cérébrale spécialisée dans le traitement auditif, c'est-à-dire l'aire auditive primaire (aire 41 de Brodmann) située dans le lobe temporal, sur la face supérieure de la première circonvolution temporale (gyrus transverse de Heschl) et au niveau des aires auditives associatives (aires 42 et 22 de Brodmann).

1.7.3. Le croisement des voies auditives

Une des particularités du système auditif est que les fibres de l'oreille droite et de l'oreille gauche se projettent sur les deux hémisphères (ipsilatéral et controlatéral). Pour chaque oreille, deux faisceaux du nerf auditif se croisent au niveau du bulbe rachidien. Par conséquent, les informations sonores recueillies, par exemple par l'oreille droite, vont être traitées à la fois dans le cortex auditif gauche et dans le cortex droit, de même pour l'oreille gauche. Cependant, la projection est plus importante sur l'hémisphère controlatéral à l'oreille stimulée (Rosenzweig, 1951). Physiologiquement, il existe une « boucle cochléo-cochléaire », le fonctionnement de l'une des cochlées va modifier la cochlée controlatérale et vice versa

(Figure 12). De plus, Davis et Johnsrude (2007) mettent en évidence des influences « top-down » des voies auditives descendantes sur la cochlée. Des mécanismes d'interaction entre les voies ascendantes et descendantes sont également montrés (Suga, Xiao, Ma, & Ji, 2002). Nous reviendrons sur ces influences des voies auditives descendantes, dans le Chapitre 5, dans l'étude du système efférent olivocochléaire médian chez un groupe de dyslexiques adultes.

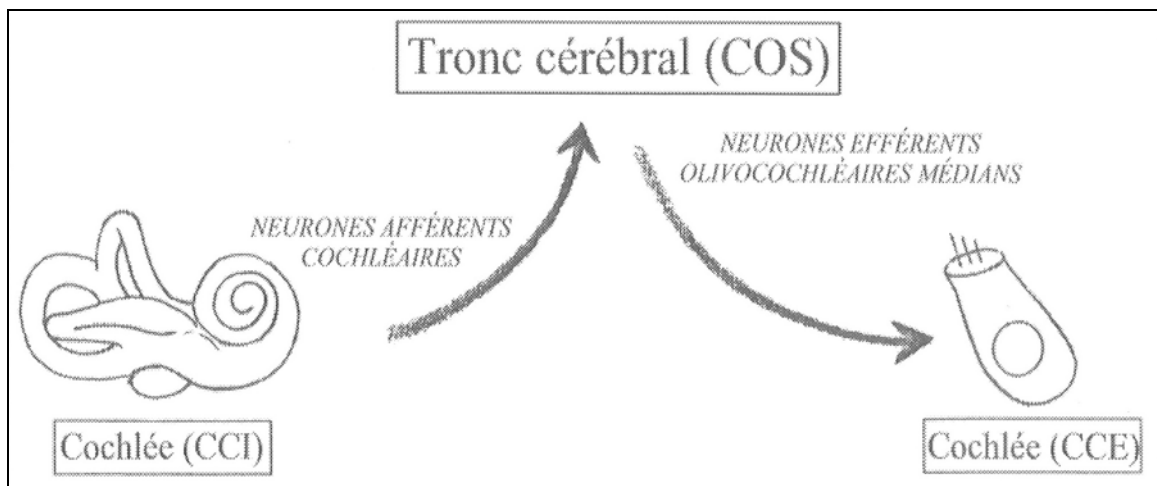


Figure 12 : Boucle cochléo-cochléaire (Tiré de la thèse de Xavier Perrot, 2003), le fonctionnement d'une cochlée interagit avec celui de la cochlée controlatérale (D'après Collet et al., 1994).

Nous venons de voir les particularités du système auditif périphérique et central, et les mécanismes de traitement et d'encodage de l'information sonore. Pour en revenir au langage en général, nous allons vous présenter les aires cérébrales impliquées dans le langage, dont certaines sont également impliquées, plus spécifiquement, dans la perception de la parole.

1.8. Les aires cérébrales du langage

Le langage est une fonction cognitive de haut niveau qui implique de nombreux processus de traitement différents mettant en jeu un réseau complexe de régions cérébrales spécialisées (Hickok & Poeppel, 2000 ; Price, 2000).

1.8.1. Le modèle classique

Au départ, nos connaissances sur les régions cérébrales impliquées dans les fonctions du langage étaient plutôt sommaires. L'aire de Broca était dédiée à la production de la parole et l'aire de Wernicke en permettait la compréhension (Figure 13). L'aire de Broca est située dans la partie inférieure du cortex frontal, chevauchant les aires 44 et 45 de Brodmann. La

partie postérieure du gyrus frontal extérieur (aire 44) serait impliquée dans le traitement phonologique et la production du langage alors que la partie antérieure de ce même gyrus (aire 45) serait davantage impliquée dans les aspects sémantiques du langage. Sans être directement impliquée dans l'accès au sens, l'aire de Broca participe donc à la mémoire verbale (sélection et manipulation d'éléments sémantiques). L'aire de Wernicke est située sur le gyrus temporal supérieur, dans la portion supérieure de l'aire 22 de Brodmann, entre le cortex auditif primaire (aire 41) et le lobe pariétal inférieur. Le composant clé de cette aire est le *planum temporale*. L'aire de Wernicke joue un rôle dans la compréhension de la parole ainsi que dans la représentation de séquences phonétiques. Le cortex moteur est également un élément important dans la fonction langagière. Il a pour rôle de recruter les régions motrices spécifiques aux organes de la parole mis en jeu lors de la production du langage parlé. Binder et al. (1997) remettent en cause ce modèle classique de localisation des aires du langage. Ils observent d'autres régions cérébrales impliquées plus précocement dans les étapes de traitement du langage. Les régions temporopariétales gauches en dehors de l'aire de Wernicke sont activées plus tôt lors de la compréhension de la parole, de même que le lobe frontal gauche et d'autres aires médiales et préfrontales qui s'étendent jusqu'à l'aire de Broca.

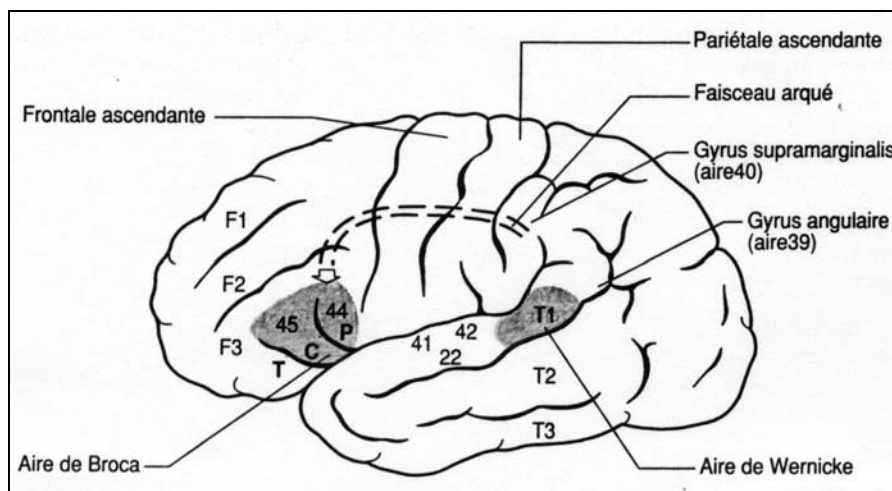


Figure 13 : Les principales aires cérébrales du langage.

1.8.2. Le lobe pariétal inférieur

De nombreuses études utilisant les techniques d'imagerie ont permis de mettre en évidence une autre région cérébrale indispensable au langage : le lobe pariétal inférieur. Il se situe au carrefour des lobes occipital, temporal et pariétal, il a de multiples interconnexions avec ces lobes, il est composé de neurones multimodaux : visuels, auditifs, et tactiles ce qui lui confère un rôle de candidat idéal pour appréhender les multiples propriétés d'un mot (son

aspect visuel, sa fonction, son nom). Il aiderait ainsi le cerveau à classer et à étiqueter les choses, une condition préalable pour former des concepts et une pensée abstraite. Le lobe pariétal inférieur est composé de deux régions distinctes : le gyrus angulaire (aire 39) et le gyrus supramarginal (aire 40). Le gyrus angulaire situé caudalement est lui-même au voisinage des aires occipitales visuelles (aires 17, 18, 19) alors que le gyrus supramarginal situé dorsalement chevauche l'extrémité de la scissure de Sylvius, adjacent à la partie inférieure du cortex somato-sensoriel (Figure 13). Le gyrus supramarginal semble impliqué dans le traitement phonologique et articulatoire des mots alors que le gyrus angulaire serait impliqué davantage dans le traitement sémantique (de concert avec le gyrus cingulaire postérieur). Le gyrus angulaire droit serait également actif, révélant ainsi une contribution sémantique de l'hémisphère droit dans le langage. Le lobe pariétal inférieur est connecté par d'importants faisceaux de fibres nerveuses à la fois à l'aire de Broca et à l'aire de Wernicke. L'information pourrait donc transiter entre ces deux régions, soit directement par le faisceau arqué (faisceau longitudinal supérieur reliant l'aire de Wernicke à l'aire de Broca), soit en passant par le lobe pariétal inférieur par une seconde route parallèle (Geschwind, 1965 ; Price, 2000).

1.8.3. Le modèle de Wernicke-Geschwind

Le modèle de Wernicke-Geschwind du langage (Geschwind, 1979) permet d'expliquer les réseaux neuronaux impliqués dans la répétition d'un mot entendu et d'un mot lu (Figure 14).

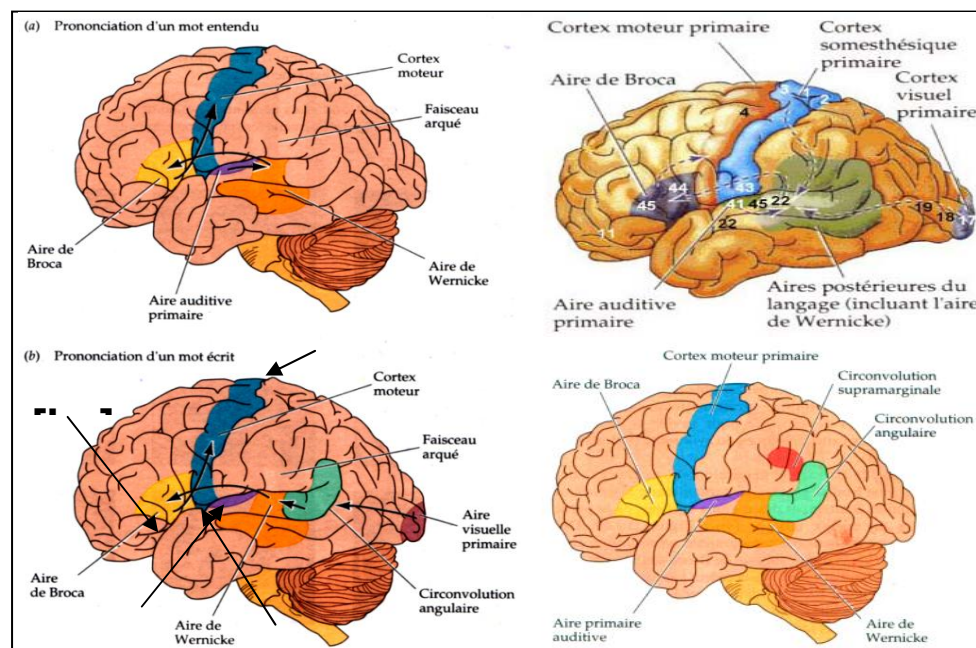


Figure 14 : Le modèle connexionniste de Geschwind-Wernicke. D'après Geschwind, 1979.

Quand on entend un mot (Figure 14 (a)), la sensation provenant des oreilles parvient au cortex auditif primaire, mais ce mot ne peut pas être compris tant que le signal n'est pas traité dans l'aire adjacente de Wernicke. Si ce mot doit être prononcé, une certaine représentation de ce mot est transmise de l'aire de Wernicke à l'aire de Broca, par l'intermédiaire d'un faisceau de fibres appelé faisceau arqué. Dans l'aire de Broca, le mot évoque un programme détaillé d'articulations qui est transmis à l'aire du visage dans le cortex moteur. À son tour, le cortex moteur commande les muscles pour qu'ils prononcent le mot. Quand on lit un mot écrit (Figure 14 (b)), la sensation est d'abord enregistrée par le cortex visuel. On pense qu'elle est ensuite transmise à la circonvolution angulaire, qui associe, dans l'aire de Wernicke, la forme visuelle du mot avec sa forme auditive correspondante. Les mêmes systèmes de neurones que précédemment vont alors intervenir dans la prononciation du mot.

Certaines aires cérébrales vont être spécialisées dans le traitement temporel, d'autres dans le traitement fréquentiel. Nous allons voir ces différences d'analyse des informations sonores.

1.9. Le traitement et l'intégration des informations sonores

Le son est caractérisé par deux principales grandeurs physiques, l'intensité et la fréquence. L'intensité d'un son correspond à son volume sonore, exprimé en décibels (dB). La fréquence est exprimée en hertz (Hz). Au niveau psychoacoustique, le temps, la fréquence et l'amplitude sont trois dimensions dépendantes les unes des autres. L'appareil auditif va traiter une onde acoustique et va créer un influx nerveux sous la forme d'un pattern spectro-temporel contenant toutes les informations perceptives (Moore, 2003). L'oreille est un transducteur spectro-temporel non-linéaire d'une grande précision dans les deux dimensions temporelle et fréquentielle. La représentation spectrographique (Figure 15) permet l'observation de ces deux dimensions ainsi que de l'intensité. Le modèle de l'audition de Lyon (1982) met en avant un rôle très important de la cochlée. L'oreille interne correspond à un ensemble de filtres non linéaires en cascade. Plus il y a de filtres, plus le modèle est précis. Carlyon (2004) met en évidence les règles utilisées par notre cerveau pour séparer les sources sonores dans l'analyse d'une scène auditive. Le cerveau doit sélectionner les informations pertinentes mais il doit également organiser ces informations dans le temps. Il est important de noter que le

système auditif s'intéresse davantage aux transitions, aux variations et aux changements qu'aux états statiques pour discriminer les phonèmes.

Les zones anatomiques responsables du traitement de toutes les caractéristiques des sons ne sont pas encore actuellement bien déterminées. L'analyse de la fréquence (tonotopie) et de la partie du spectre sonore impliquée semble s'effectuer au niveau du cortex auditif primaire (aire 41 de Brodmann ou gyrus de Heschl), du cortex associatif primaire (aire 42) ou du cortex associatif secondaire (aire 22) (Crottaz-Herbette & Ragot, 2000). Une spécialisation de l'hémisphère gauche pour le traitement des traits acoustiques transitoires a été mise en évidence (Johnsrude, Zatorre, Milner, & Evans, 1997).

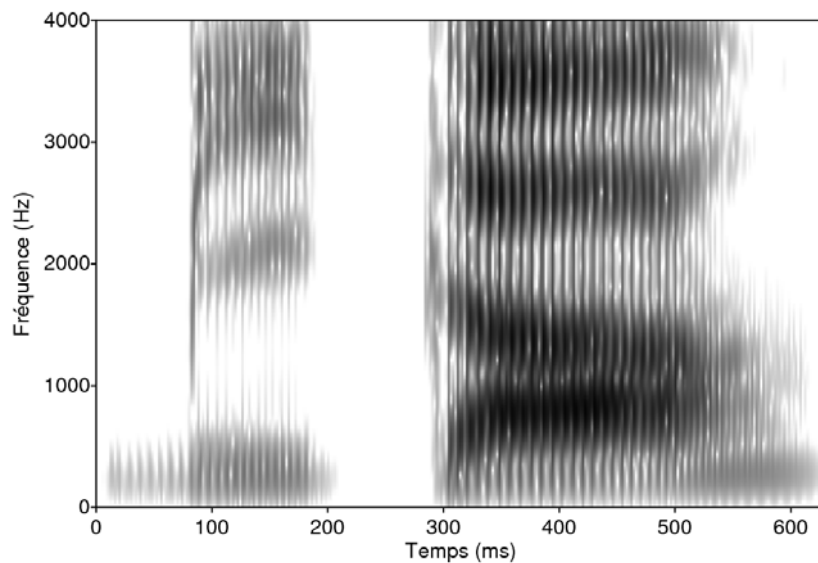


Figure 15 : Spectrogramme du pseudo-mot [bita] (l'intensité correspond au niveau de gris).

À chaque relais de la voie auditive primaire, un travail de décodage et d'interprétation est effectué qui est transmis par la suite au relais supérieur. L'organisation cartographique des fréquences (tonotopie) est conservée à chaque relais, en plus d'une spécialisation. La tonotopie peut être définie comme une organisation spatiale des fréquences sonores. La discrimination des fréquences s'effectue donc à partir de la cochlée grâce à la sélectivité fréquentielle de la membrane basilaire, elle se maintient tout le long des relais à l'aide des filtres auditifs. Ces filtres correspondent à des mécanismes qui amplifient une certaine fréquence (valeur centrale du filtre) et atténuent les autres fréquences. Chaque neurone est particulièrement sensible à une fréquence donnée, appelée la fréquence caractéristique (FC), et est moins sensible aux fréquences proches. Dans chaque relais, les neurones présentent également des propriétés différentes. Une résolution temporelle fine est maintenue très rapidement dans le système auditif, ce qui permet de fournir des indices nécessaires à

l'intégration binaurale. Les cellules de l'olive supérieure sont activées par les noyaux cochléaires à partir des deux côtés du tronc cérébral. Ces neurones qui répondent à la stimulation des deux oreilles semblent jouer un rôle important dans la localisation des sons.

Scott et Wise (2004) postulent qu'il existe deux voies de traitement lors de la perception de la parole. Une voie antérieure dédiée au traitement des indices acoustico-phonétiques et une voie postérieure impliquée dans les processus d'encodage des mouvements articulatoires. Cette division anatomo-fonctionnelle a été rapprochée de la division entre la théorie motrice et la théorie perceptuelle de la perception de la parole (Scott & Johnsrude, 2003) Une relation étroite existe entre les deux systèmes ce qui permettrait la coexistence des deux théories.

L'organisation temporelle du signal de parole est donc primordiale pour une bonne intelligibilité des sons de parole et notamment, l'intégrité des traits distinctifs qui composent les sons de la parole. Dans cette thèse, nous allons explorer les effets de la compression temporelle de traits distinctifs (le voisement et les transitions des formants) sur l'intelligibilité des sons de parole chez des normo-lecteurs et des dyslexiques (Chapitres 2 et 4). Nous étudierons donc le traitement de segments temporels rapides par le normo-entendant sans trouble du langage et le normo-entendant dyslexique. Nous aborderons également le problème de la variabilité interindividuelle lors de l'identification des stimuli compressés à laquelle nous avons été confrontés (Chapitre 3). Nous terminerons par une étude plus approfondie des troubles de traitement temporel de la parole chez les adultes dyslexiques. Pour cela, nous évaluerons les voies auditives descendantes de notre population dans le but de mettre en évidence des déficits auditifs corrélés à leurs difficultés d'identification des sons rapides de la parole (Chapitre 5).

Chapitre 2

La perception de la parole : dimension temporelle

*« Il faut donner du temps au temps. » Miguel de CERVANTES SAAVEDRA
« Le propre des durées individuelles est qu'elles possèdent un contenu différent
pour chaque conscience. » Ziegler, Le pouvoir africain. Seuil, p.191.*

2.1. Introduction

Dans ce second chapitre, nous explorons l'intelligibilité de la parole dans des conditions d'écoute difficile, notamment lors de modifications temporelles du signal de parole. Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1, le signal acoustique de la parole peut subir de nombreuses distorsions aussi bien par des facteurs extrinsèques lors de sa propagation dans le milieu environnant que par des facteurs intrinsèques au locuteur ou à l'auditeur. Le signal de parole comporte deux dimensions caractéristiques : la dimension spectrale et la dimension temporelle. La dynamique temporelle apparaît primordiale dans l'intégrité du signal de parole et par conséquent dans son identification et sa compréhension. Les modifications naturelles de débit du locuteur conduisent à une distorsion de la dimension temporelle du signal de parole. Lors d'une accélération de débit par exemple, des études en production ont mis en évidence des effets de coarticulation importants (e. g. Liberman, Cooper, Shankweiler, & Studdert-Kennedy, 1967). Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1, ce phénomène de coarticulation correspond à une réduction temporelle de certains traits acoustiques aux dépens d'autres traits. Les gestes articulatoires vont se réaliser en même temps et les informations vont se superposer. Un effet majeur de ce phénomène est d'améliorer la perception du signal de parole lors de conditions de débit rapide, en mettant l'accent sur certains traits primordiaux,

comme c'est le cas pour les consonnes par rapport aux voyelles. Parmi les indices acoustiques qui composent le signal de parole, deux indices ont été largement étudiés pour leur rôle dans l'identification de la parole : le VOT et les Transitions Formantiques, plus particulièrement celle du second formant (TF2). La variation de durée des indices acoustiques est un point essentiel dans l'extraction et l'intégration temporelle du signal. En effet, la durée des indices peut être un des facteurs de discrimination des phonèmes. Un phonème est constitué de différents traits pertinents discriminants qui lui permettent d'être catégorisé. Nous nous intéresserons essentiellement à 4 des 6 consonnes occlusives orales [b d p t] du français. Le voisement permet de distinguer les occlusives non voisées [p t] des occlusives voisées [b d], alors que la transition du second formant permet d'identifier les occlusives selon leur lieu d'articulation : bilabial [b p] et alvéolaire [d t]. Dans le Chapitre 1, nous avons décrit les différences spectro-temporelles du signal acoustique des occlusives et des voyelles. Les occlusives sont constituées d'indices acoustiques courts et transitoires, ce qui devrait les rendre plus sensibles aux compressions temporelles que les voyelles qui ont une partie stable importante. Les caractéristiques acoustiques des phonèmes seront les principales informations disponibles, avec les informations syllabiques, pour l'identification des stimuli qui seront des pseudo-mots, donc dépourvus de représentations lexicales.

2.2. Problématique et Hypothèses

Notre problématique repose sur le fait que la dimension temporelle du signal de parole est primordiale pour une bonne intelligibilité des sons de parole ainsi que pour l'intégrité des indices acoustiques qui composent les sons de la parole. En perception, nous examinons les effets d'une manipulation temporelle de certains traits acoustiques sur l'intelligibilité des sons de parole chez des participants normo-lecteurs et normo-entendants. Nous explorons la part respective de chaque trait (le voisement et les transitions formantiques) dans l'identification de la parole dans des conditions normales et lorsque celle-ci est compressée. L'objectif de ce travail est d'étudier les traits acoustiques des consonnes occlusives qui induiraient des difficultés de perception chez des adultes normo-entendants et normo-lecteurs.

Notre émettons l'hypothèse générale selon laquelle nous devrions observer un effet de la compression temporelle sur l'intelligibilité des pseudo-mots. Plus la compression est importante, plus l'intelligibilité des stimuli diminue. Nous postulons également qu'il existe une limite aux mécanismes de substitution des informations manquantes ou détériorées. Ces mécanismes deviendraient moins efficaces au-delà d'une certaine quantité d'informations perdues (au delà de 50% de compression). Le système ne serait pas capable de remplacer les informations manquantes au-delà d'un certain seuil. Le signal étant trop dégradé, il ne serait pas possible de le reconstituer et de retrouver son message d'origine.

Quatre expériences vont être menées dans ce Chapitre 2. Dans l'Expérience 1, nous manipulons l'indice de voisement alors que dans l'Expérience 2, nous compressons temporellement l'indice de lieu d'articulation. Dans l'Expérience 3, les deux indices sont simultanément compressés. Nous terminerons par une compression linéaire du signal entier dans l'Expérience 4.

Les hypothèses opérationnelles sont les suivantes :

- Nous supposons que les deux traits acoustiques ne jouent pas le même rôle dans l'identification des occlusives. Le trait de voisement devrait être un indice temporel indispensable pour l'identification des occlusives. Par conséquent, les performances d'identification des pseudo-mots devraient être affectées dans l'Expérience 1. Au contraire, nous émettons l'hypothèse selon laquelle la transition du F2 serait un trait distinctif résistant à la compression temporelle car la transition est à une double nature, à la fois fréquentielle et temporelle. Les informations fréquentielles prendraient

le relais si les informations temporelles sont altérées. L'identification des pseudo-mots devrait donc être peu affectée par la compression temporelle (Expérience 2).

- La compression temporelle associée des deux traits acoustiques devrait nous renseigner sur les relations qui existent entre les processus de traitement de ces deux traits. Soit les deux traits sont traités indépendamment l'un de l'autre, en parallèle, donc nous devrions observer des effets similaires. Soit les processus de traitement des deux traits interagissent ce qui conduiraient à une intégration complexe des effets des Expériences 1 et 2. Nous supposons que les traitements des deux traits interagissent l'un sur l'autre. La compression d'un trait devrait avoir une conséquence sur le traitement du second trait. Nous nous attendons donc à observer une perte d'intelligibilité plus importante lorsque les deux traits seront compressés (Expérience 3).
- On peut également penser que la compression temporelle linéaire (proportionnelle) du signal perturbe l'extraction et le traitement d'autres traits acoustiques que les deux que nous étudions. La compression linéaire reflète des conditions plus écologiques de production de parole rapide. La comparaison de cette Expérience 4 avec les Expériences 1 et 2 mettra en évidence la redondance du signal. Le contexte vocalique ou consonantique des autres phonèmes fournit des informations qui peuvent se substituer aux informations manquantes. La redondance du signal ne pourrait pas pallier complètement à l'altération trop importante d'informations acoustiques, ce qui conduirait à une perte d'intelligibilité encore plus importante (Expérience 4).

2.3. Expérience 1 : Compression temporelle du trait de voisement

2.3.1. Méthode

2.3.1.1. Stimuli

Le matériel expérimental était composé de 64 pseudo-mots bisyllabiques de forme Consonne-Voyelle-Consonne-Voyelle (CVCV) et de 16 distracteurs de forme Voyelle-Consonne-Voyelle (VCV). Pour les consonnes, nous avons opté pour les quatre consonnes occlusives /b d p t/ pour plusieurs raisons. Premièrement, ces consonnes sont composées de segments acoustiques courts et rapides (silence, explosion, transitions et des indices liés au trait de voisement). Deuxièmement, de nombreuses études en perception ont porté sur ces consonnes (Serniclaes, 1987 ; Snoeren, Hallé, & Segui, 2006). Les quatre consonnes occlusives de la langue française sont différenciables par leur voisement (voisée : /b d/ ou non voisée : /p t/) et leur lieu d'articulation (bilabial : /b p/ ou alvéolaire : /d t/). Les voyelles accompagnatrices /i/ et /a/ (les plus fréquentes dans le système vocalique français) ont été choisies de façon à ce qu'une grande variabilité acoustique entre les syllabes soit obtenue. Les voyelles, toutes deux antérieures, se différencient par leur degré d'aperture : /i/ est la voyelle la plus fermée alors que /a/ est la plus ouverte (elles occupent des positions très écartées dans le triangle vocalique). Toutes les combinaisons ont été générées : $(4C_1 \times 2V_1 \times 4C_2 \times 2V_2 = 64 C_1V_1C_2V_2)$ (Tableau 1). La position des consonnes sera un facteur testé dans nos analyses statistiques : C_1 correspond à la position en attaque et C_2 à la position intervocalique. Les distracteurs ont été construits de la même manière (p. ex. /ipa/).

Les stimuli ont été produits par un seul locuteur français et enregistrés dans une chambre sourde avec un microphone Sony ECM-MS907. Les pseudo-mots ont été répétés trois fois de manière isolée et la meilleure version a été choisie, en nous basant à la fois sur l'observation du signal acoustique et du spectrogramme. Les fichiers sons étaient sauvegardés sous le format *waveform audio* (WAV) et échantillonnés à 22 kHz (stéréo, 16 bits).

Tableau 1 : Distribution des combinaisons des consonnes d'attaque et intervocaliques avec les voyelles dans les stimuli.

Consonnes	Voyelles		Total
	/a/	/i/	
Attaque (C1)			
/b/	8	8	16
/d/	8	8	16
/p/	8	8	16
/t/	8	8	16
Total	16	16	64
Intervocalique (C2)			
/b/	8	8	16
/d/	8	8	16
/p/	8	8	16
/t/	8	8	16
Total	16	16	64

Chaque item a été segmenté manuellement et la durée de chaque indice acoustique (le voisement et les transitions des formants) a été mesurée manuellement à l'aide du logiciel Praat. Nous avons observé d'une part, la forme de l'onde acoustique ainsi que le spectrogramme du signal, d'autre part, nous avons utilisé la transcription du pseudo-mot ainsi que l'enregistrement sonore du signal. Ainsi, le trait de voisement a été segmenté à partir du début des pulsations périodiques régulières jusqu'à la détente de l'occlusion : pour les occlusives voisées, nous parlons de barre de voisement (ou prévoisement) alors que pour les occlusives non voisées, nous parlons de *Voice Onset Time* (ou, Délai d'Établissement du Voisement, en français). Cette segmentation rend compte de différences entre les segments manipulés pour les occlusives voisées et non voisées. Pour les occlusives voisées, nous manipulons la durée de l'occlusion alors que pour les occlusives non voisées, nous traitons un segment qui comprend une plus grande quantité d'informations (principalement le bruit d'explosion de la consonne). La transition du F2 a été délimitée à partir du début du F2, elle correspond à des changements fréquentiels brusques et rapides, lors de la transition entre la consonne et la voyelle, jusqu'à la partie stable de la voyelle mesurée sur une représentation spectrographique en délimitant la zone où les formants sont parallèles à l'axe du temps. La Figure 16 montre, de manière schématique, les différents indices acoustiques que nous avons manipulés.

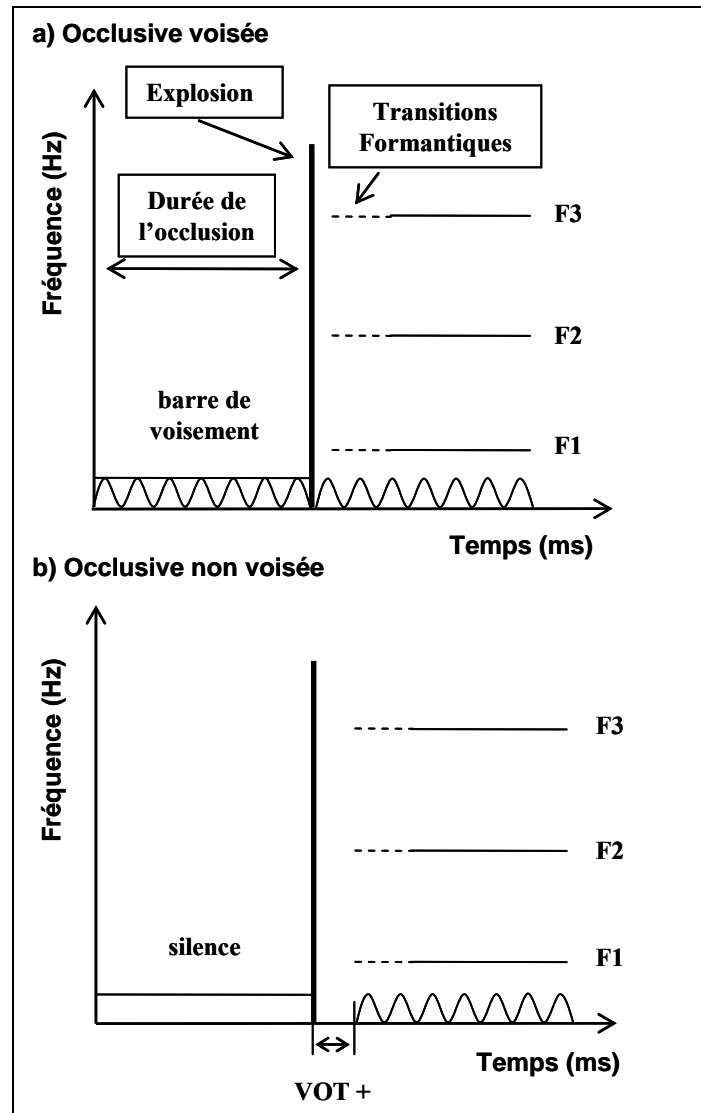


Figure 16 : Schéma représentant les indices acoustiques manipulés dans nos expériences, la barre de voisement, le VOT positif et les transitions formantiques. (a) Exemple d'une occlusive voisée et (b) d'une occlusive non voisée, quelle que soit la voyelle qui suit.

Pour les deux indices de chaque syllabe CV, la durée a été compressée selon quatre conditions expérimentales : une condition naturelle correspondant à la durée initiale (100%), une condition 50% correspondant à 50% de la durée initiale, de même, une condition 25% et une condition 0% où les traits sont entièrement supprimés. Un exemple de stimulus est présenté dans la Figure 17. Un pré-test a permis d'établir les taux de compression à partir desquelles une perte d'intelligibilité était observée. Les compressions temporelles des traits acoustiques ont été faites dans Praat suivant la méthode Pitch-Synchronous Overlap Add (PSOLA) (Charpentier & Stella, 1986). L'intérêt de cette méthode est que l'intelligibilité et la qualité du signal reste très bonne même lorsqu'on accélère le signal d'un facteur 2. La hauteur originale du signal est conservée. L'important est que même s'il existe des changements au

niveau spectral, ils ne sont pas perçus par les auditeurs ou ils ne sont pas pertinents au niveau phonétique. Pour raccourcir la durée, avec PSOLA, la première étape va être le marquage des oscillations périodiques ainsi que des morceaux sans oscillations où des marqueurs sont placés à des intervalles moyens. La seconde étape est la suppression de manière linéaire de certaines périodes du signal (1 sur 2) afin d'obtenir la durée voulue. Ensuite, l'étape suivante est l'addition des différentes parties ce qui va donner un signal avec moins d'oscillations périodiques que le signal d'origine. Pour résumer, le but de l'analyse est d'effectuer un fenêtrage exactement synchronisé aux périodes fondamentales du signal. Le signal de synthèse est alors reconstitué par superposition-addition (*overlap-add*) de ces formes d'onde élémentaires. De plus, les indices segmentés du signal acoustique peuvent être compressés alors que le reste du signal reste intact.

2.3.1.2. Procédure

Les participants étaient assis dans une pièce silencieuse face à un écran d'ordinateur. Les stimuli étaient émis en modalité auditive binaurale à l'aide d'un casque (Beyerdynamic DT 48, 200 Ω) et présentés dans un ordre aléatoire différent pour chaque participant. Les participants étaient informés qu'un signal de parole, pas nécessairement un mot, allait être présenté dans le casque et qu'ils devaient taper sur le clavier tout ce qu'ils avaient entendu. Un entraînement leur était préalablement proposé et la séance durait environ 15 minutes.

2.3.1.3. Participants

Quarante-quatre participants, âgés de 18 à 39 ans, ont participé à cette expérience (12 hommes, moyenne d'âge = 21.7 ans, écart-type = 4.5). Tous les participants étaient de langue maternelle française et n'avaient jamais connu aucun trouble auditif, du langage, ou neurologique. Les participants ont été indemnisés de 7.50 €/h pour leur participation à l'expérience.

2.3.1.4. Plan expérimental

Le plan expérimental pour l'expérience 1 est $S_{44} * I_8 < P_2 * C_4 >$ avec :

S : les Sujets au nombre de 44.

I : les Items présentés (2 fois) au nombre de 8 par conditions (/ba/, /bi/, /da/, /di/, /pa/, /pi/, /ta/, /ti/).

P : la variable Position à deux modalités : consonne d'attaque et intervocalique.

C : la variable taux de Compression des items à quatre modalités : 100, 50, 25 et 0%.

Les variables indépendantes (VI) sont toutes les deux des variables intra-sujets. Il s'agit des facteurs Position et taux d'Accélération. La variable dépendante (VD) correspond aux taux de restitution correcte des sujets (%).

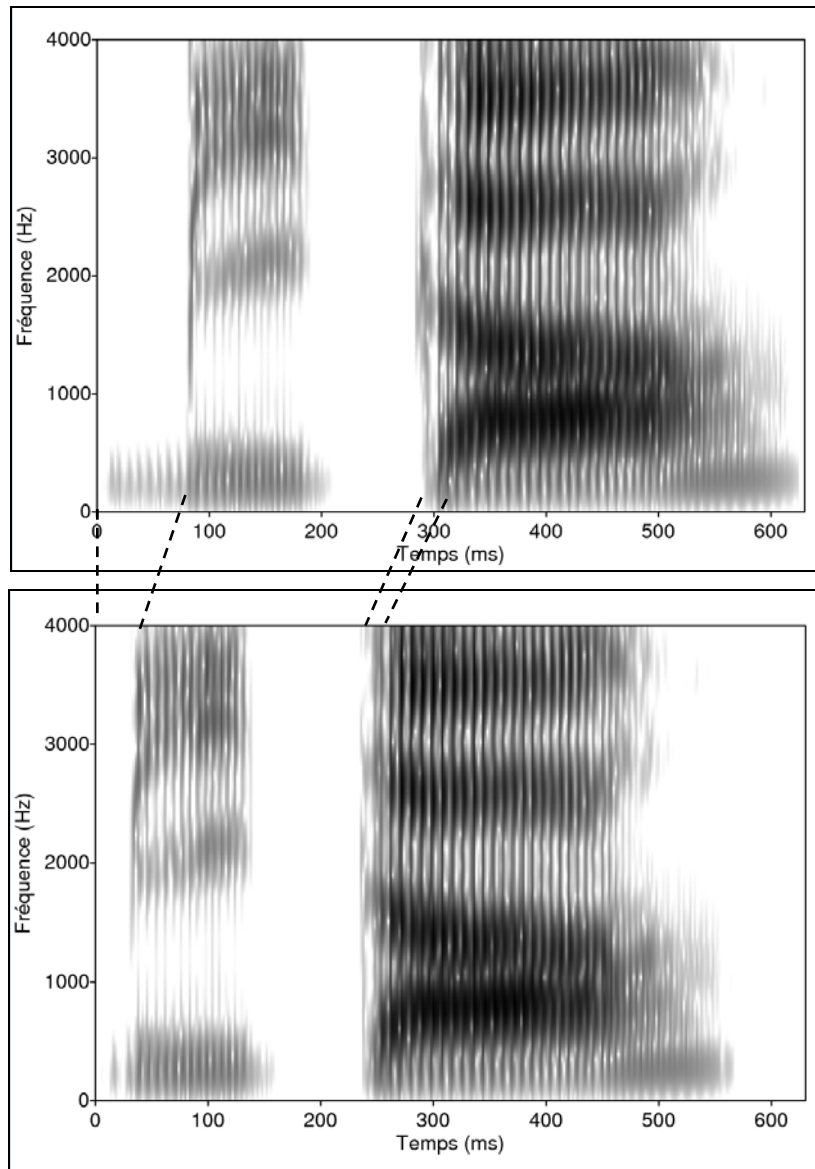


Figure 17 : Exemple de la compression temporelle du pseudo-mot [bita] dans l'Expérience 1 où le trait de voisement est compressé. En haut, spectrogramme du stimulus dans la condition naturelle (100%). En bas, spectrogramme du stimulus dans la condition C₁ 25%_C₂ 50%.

2.3.2. Résultats

Les réponses des participants ont été cotées suivant le nombre de consonnes et de voyelles rappelées (1, si le phonème a été identifié correctement ou 0, dans le cas contraire).

Un test t sur échantillons appariés permet de comparer les moyennes obtenues pour chacun des phonèmes (C_1 , V_1 , C_2 et V_2). Le test met en évidence un effet de position sur l'identification des consonnes. Une différence significative a été observée pour les consonnes mais pas pour les voyelles (Consonne : $t_{44} = -2.24$; $p < .05$ et Voyelle : $t_{44} = -1.14$; n.s.). Le Tableau 2 montre les taux d'identification correcte des phonèmes et des pseudo-mots. Globalement, les voyelles sont les phonèmes les mieux rappelés par rapport aux consonnes (99.7% vs. 88.8%). La consonne en position intervocalique est significativement mieux identifiée que la consonne en position d'attaque (89.6%, $\sigma = 4.3$ vs. 88%, $\sigma = 4.8$).

Tableau 2 : Pourcentages d'identification correcte des phonèmes et des pseudo-mots pour l'Expérience 1 (%) quel que soit le taux de Compression. Résultats des t tests sur échantillons appariés : effets de Position de la consonne dans le pseudo-mot (* $p < .05$).

		C_1	V_1	C_2	V_2	CVCV	p
Expérience 1	Voisement	88	99.7	89.6	99.8	79.1	*

2.3.2.1. Modèle mixte

Les données ainsi obtenues pour tous les items et pour tous les participants ont été analysées statistiquement à l'aide du modèle d'analyse de variance mixte (ANOVA mixte). Nous avons choisi ce modèle car il permet d'effectuer des tests inférentiels en incluant simultanément les participants et les items comme variables aléatoires. Une analyse par participant correspond à une ANOVA sur les moyennes par participant et par condition. Une analyse par item est une ANOVA sur les moyennes par item et par condition. La validité inférentielle des analyses réalisées séparément pour les participants et les items a souvent été remise en question (Brysbaert, 2007). Ainsi lorsque seule l'analyse par participant est effectuée, les items peuvent être masqués, justifiant ainsi la prise en compte dans nos tests statistiques de la variabilité due aux items en plus de la variabilité due aux participants (Clark, 1973). De plus, il a été observé que l'analyse par item était très conservatrice, menant souvent à une absence de significativité. Raaijmakers (2003) ajoute même que les deux tests associés (participants et items), s'ils sont significatifs, ne sont pas suffisants pour généraliser à tous les sujets et tous les items. Ainsi le modèle mixte (à plusieurs niveaux) semble de nos jours plus à

même pour analyser les données psycholinguistiques (Baayen, 2008 ; Baayen, Davidson, & Bates, 2008).

Nous avons effectué une analyse statistique ANOVA mixte (logiciel SPSS) en considérant comme variables aléatoires : les Sujets et les Items et comme variables fixes : la Position de la consonne et les taux de Compression des traits phonétiques. La variable dépendante étant le score d'identification correcte pour tous les sujets et pour tous les items.

Nous procédons à deux analyses séparées des occlusives voisées et des occlusives non voisées. Comme nous l'avons expliqué auparavant, nous ne pouvons les comparer directement les unes aux autres puisque nous ne manipulons pas les mêmes informations pour ces deux types de consonnes : pour les occlusives voisées, nous avons segmenté la durée du voisement ; pour les occlusives non voisées, nous avons manipulé le VOT.

Les occlusives voisées

Une ANOVA mixte avec comme facteurs la Position des consonnes (C_1 , C_2) et les taux de Compression du trait de voisement (100, 50, 25 et 0%) a présenté deux effets principaux significatifs de la Position des consonnes dans le pseudo-mot [$F(1,2765) = 100.44$; $p < .001$] et des taux de Compression du trait [$F(3,2765) = 184.93$; $p < .001$]. Un test de comparaison à posteriori de Bonferroni a permis de montrer que la consonne d'attaque a un taux d'identification correcte moyen significativement plus élevé que la consonne intervocalique (95.2% vs. 85.7%). De plus, il est important de noter que l'effet de la compression temporelle du trait de voisement sur l'identification n'est observé que pour le taux 25% (94.3%) ou lorsque le trait est totalement supprimé (71.3%). Les performances des participants ne sont pas significativement diminuées à 50% de compression (97.9%) par rapport à la condition contrôle 100% (98.4%). De plus, il existe un effet d'interaction significatif entre la Position et les taux de Compression [$F(3,2765) = 79.52$; $p < .001$]. Des comparaisons par paire montrent qu'en position d'attaque, il n'y a pas d'effet de la compression temporelle, la baisse d'intelligibilité est significative uniquement dans la condition 0% (98%, 97.7%, 96.6% vs. 88.6% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Alors qu'en position intervocalique, un effet de la compression est significatif à 25% (98.9%, 98% vs. 92% ; $p < .01$ pour toutes les comparaisons). Le taux d'identification correcte baisse encore plus significativement à 0% (54% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons) (Figure 18). Un effet de la Position est mis en évidence aux conditions 25% et 0% : le taux d'identification

correcte est supérieur en position d'attaque qu'en position intervocalique (25% : 96.6% vs. 92%, $p < .05$ et 0% : 88.6% vs. 54%, $p < .001$).

Les occlusives non voisées

Une ANOVA mixte avec comme facteurs la Position des consonnes (C_1 , C_2) et les taux de Compression du trait de voisement (100, 50, 25 et 0%) a présenté deux effets principaux significatifs de la Position des consonnes dans le pseudo-mot [$F(1,2762) = 131.93$; $p < .001$] et des taux de Compression du trait [$F(3,2762) = 196.57$; $p < .001$]. Un test de comparaison de Bonferroni a permis de montrer que, contrairement aux occlusives voisées, la consonne intervocalique a un taux d'identification correcte moyen significativement plus élevé que la consonne d'attaque (93.5% vs. 80.8%). De plus, il est important de noter que l'effet de la compression temporelle du trait de voisement sur l'identification n'est observé que pour le taux 25% (90.9%). Les performances diminuent significativement également lorsque le trait est totalement supprimé (64.2%). Les performances des participants ne sont pas significativement diminuées à 50% de compression (96%) par rapport à la condition contrôle 100% (97.3%). De plus, il existe un effet d'interaction significatif entre la Position et les taux de Compression [$F(3,2762) = 25.47$; $p < .001$]. Des comparaisons par paire montrent des résultats inverses de ceux des occlusives voisées. En position d'attaque, un effet de la compression est significatif à 25% (95.2%, 92.6% vs. 85.5% ; $p < .01$ pour toutes les comparaisons). Le taux d'identification correcte baisse encore plus significativement à 0% (49.7% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Alors qu'en position intervocalique, il n'y a pas d'effet de la compression temporelle, la baisse d'intelligibilité est significative uniquement dans la condition 0% (99.4%, 99.4%, 96.3% vs. 78.7% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons) (Figure 18). Un effet de Position est mis en évidence pour toutes les conditions : le taux d'identification correcte est supérieur en position intervocalique qu'en position d'attaque ($p < .05$ pour toutes les comparaisons).

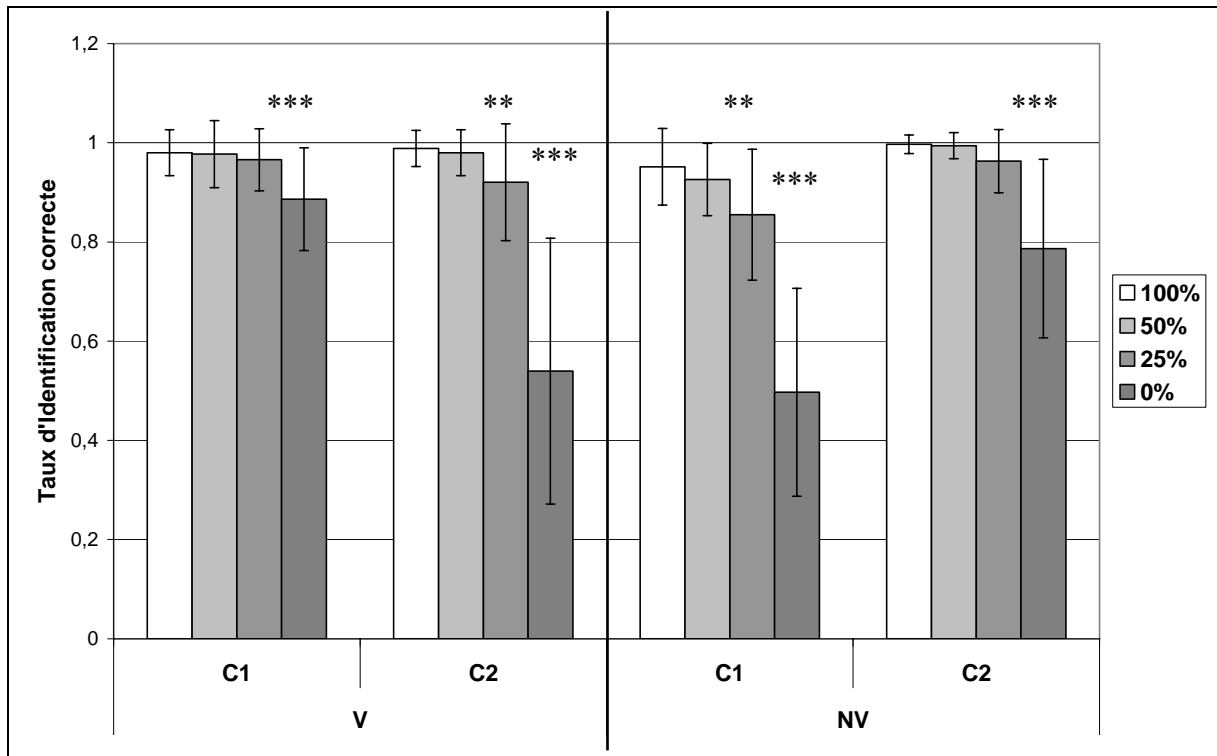


Figure 18 : Performances d'identification pour les occlusives voisées (V) et les non voisées (NV), selon la Position (C1 et C2) et le taux de Compression (100, 50, 25 et 0%) (***) $p < .001$, ** $p < .01$ et * $p < .05$).

Pour la suite des résultats, une analyse quantitative des erreurs n'étant pas possible du fait du trop faible nombre d'erreurs, nous présenterons une analyse qualitative illustrée par les matrices de confusion des participants.

2.3.2.2. L'analyse qualitative des erreurs

Les matrices de confusion présentent les erreurs faites sur les occlusives par les participants en position d'attaque (C₁) et en position intervocalique (C₂) (Tableau 3). Une analyse complémentaire des erreurs a également été menée selon la voyelle qui suivait la consonne dans la forme CV. Seuls les résultats qualitatifs pertinents de cette analyse seront présentés par la suite. De plus, cette analyse a été faite pour les trois premières expériences et pas dans l'Expérience 4 afin de circonscrire l'effet de la voyelle intacte sur l'identification de la consonne.

Les occlusives voisées

en position d'attaque

Pour les occlusives voisées, les erreurs sont principalement des erreurs de voisement (13%) comme par exemple, /b/ qui est confondu avec /p/ et /d/ est identifié comme un /t/. Ce sont des erreurs de dévoisement qui sont présentes en condition naturelle à un très faible taux (2.1%) et qui s'accroissent avec la compression temporelle et encore davantage avec la suppression du trait de voisement (7.7%). Le taux d'omission des occlusives voisées est moins important que le taux de confusion (21.2% vs. 78.8%), c'est encore plus vrai pour /d/ (11.4% vs. 88.6%).

Tableau 3 : Matrices de confusion de l'Expérience 1 (N = 176 = 44 sujets x 2 V x 2 répétitions).

		C₁							
100%		b	d	p	t	k	ø		
b		175		1					
d			170		6				
p			1	167	7		1		
t			1	2	168	5			
50%		b	d	p	t	g	ø		
b		175		1					
d			169		3	1	3		
p		5		159	1		11		
t			2	5	167		2		
25%		b	d	p	t	n	f	ø	
b		173	2			1			
d			167		7			2	
p		3		157	5			11	
t			6	17	144		1	8	
0%		b	d	p	t	v	f	m	ø
b		150	1	13		1		1	10
d		1	162		13				
p		8		101	1		1		65
t		5	19	26	74				52

		C₂								
100%		b	d	p	t	ø				
b		174		1		1				
d			174		1	1				
p				175	1					
t					176					
50%		b	d	p	t	r	ø			
b		172		2		1	1			
d		1	173		2					
p		1		175						
t				1	175					
25%		b	d	p	t	l	r	ø		
b		150	7	1		9	5	4		
d			174			1	1			
p		3		173						
t			4	5	166			1		
0%		b	d	p	t	g	l	r	n	ø
b		77	11	7	1		67	4		9
d			113	1	3		50	7	1	1
p		6		166	1					3
t			32	12	111	1				20

en position intervocalique

En position intervocalique, les erreurs vont être plus nombreuses (4.7% d'erreurs en attaque et 14% en intervocalique) et vont être de différentes natures. Le dévoisement est retrouvé dans une plus faible proportion dans la condition naturelle (0.7%) et au taux de compression à 50% (1.4%). À 25%, les participants ne font plus d'erreurs de voisement mais des erreurs sur le lieu d'articulation (7.2%). Par exemple, /b/ devient /d/, /l/ ou /r/ c'est-à-dire que la bilabiale est confondue avec des alvéolaires. Un plus grand nombre de confusions portent sur la bilabiale /b/ qui est perçue comme un /l/ ou un /r/, mais /d/ montre le même type de confusions. Ces erreurs correspondent à des erreurs de mode d'articulation : l'occlusive /b/ est confondu avec des liquides. Ces erreurs sur le lieu et sur le mode d'articulation deviennent plus fréquentes lorsque le trait de voisement est supprimé. Même observation qu'en position d'attaque, le taux d'omission des occlusives voisées est beaucoup moins important que le taux de confusion (7.6% vs. 92.4%), et c'est encore plus vrai pour /d/ (98.5% de confusions).

Les occlusives non voisées**en position d'attaque**

Les erreurs des occlusives non voisées sont plus importantes dans cette position en début de mot (18.8% d'erreurs en attaque et 6.3% en intervocalique). Les deux occlusives non voisées ne sont pas affectées de la même manière : /p/ est majoritairement omis (64%), alors que le /t/ est principalement confondu (58.9%), le plus souvent avec /p/ et ce, dès 50% de compression.

en position intervocalique

Les erreurs sont moins nombreuses et la majorité des erreurs correspondent à des confusions pour /t/ mais également pour /p/ (75.3%). L'alvéolaire /t/ est plus souvent confondu avec /d/ et /p/ avec /b/, ce qui rend compte d'un phénomène de voisement des occlusives non voisées. L'occlusive alvéolaire est plus sensible à la suppression du trait de voisement que l'occlusive bilabiale. Elle montre des erreurs de voisement (/t/ -> /d/ ; 13.4%), sur le lieu d'articulation (/t/ -> /p/ ; 4.5%) et des omissions (/t/ -> rien ; 7.9%).

2.3.3. Discussion

L'Expérience 1 a mis en évidence les effets de la compression temporelle du trait de voisement sur l'identification des occlusives en français. Nous avons procédé à deux analyses séparées des occlusives voisées et non voisées, du fait de la différence de nature des indices acoustiques manipulés. La compression temporelle portait sur la barre de voisement pour les occlusives voisées alors qu'elle portait sur le VOT pour les occlusives non voisées.

2.3.3.1. L'effet de Position

Les occlusives voisées étaient moins sensibles à la compression temporelle en position d'attaque du pseudo-mot. Une chute des performances d'environ 10% était observée en position intervocalique. Au contraire, les occlusives non voisées étaient mieux identifiées en position intervocalique qu'en attaque. Les performances en position intervocalique étaient plus hautes d'environ 13%. Nous reviendrons sur cet effet de position de la consonne dans le pseudo-mot, dans la discussion générale.

2.3.3.2. L'effet de la Compression temporelle

Pour les deux types d'occlusives, nous n'avons pas observé d'effet de la compression temporelle à 50%. La réduction de moitié de la durée des traits de voisement, aussi bien pour le prévoisement que pour le VOT, n'a pas affecté l'intelligibilité des stimuli. Par contre, un effet de la compression temporelle à 25% de la durée du voisement a réduit les taux d'identification des occlusives voisées et non voisées (d'environ 5%). Les taux d'identification des occlusives voisées et non voisées sont encore plus sensibles à la suppression du trait de voisement (25-30% de réduction). Cet effet de compression temporelle sur les performances d'identification des participants sera étudié grâce à une analyse acoustique de la durée du trait de voisement (paragraphe 2.7).

L'analyse qualitative des erreurs induites par la compression temporelle montre également des différences entre les occlusives voisées et non voisées.

2.3.3.3. Les occlusives voisées

En position d'attaque, les occlusives voisées subissent un dévoisement (/b/ -> /p/ et /d/ -> /t/). La durée du voisement (ou de l'occlusion), si elle est raccourcie, va conduire logiquement à un dévoisement des occlusives voisées. En position intervocalique, les erreurs sur les

occlusives voisées sont plus nombreuses qu'en attaque et correspondent à des confusions de lieu et de mode d'articulation (/b/ et /d/ -> /l/ et /r/). Les consonnes [l] et [ʀ], en français, sont classiquement classées parmi les consonnes dites liquides (Casagrande, 1984). Les liquides sont des consonnes voisées qui ont une structure formantique, comme les voyelles. Il n'y a toutefois pas d'occlusion, mais une faible friction c'est-à-dire que l'air n'est jamais comprimé derrière une fermeture en un point quelconque du conduit buccal. Les caractéristiques articulatoires et acoustiques des liquides expliquent pourquoi les occlusives voisées se confondent avec elles en position intervocalique.

Dans l'étude de Carré, Serniclaes et Marsico (2003), les auteurs remarquent que la combinaison des trois indices acoustiques : le prévoisement, les transitions et la durée des voyelles induit un changement de perception du mode d'articulation des occlusives. Par exemple, ils citent l'étude de Miller et Liberman (1979) dans laquelle la frontière catégorielle entre [ba] et [wa] dépend fortement des informations qui suivent la consonne et la semi-voyelle. Nous pouvons supposer que les informations précédentes dans notre étude, comme la transition VC va modifier la perception du mode d'articulation de l'occlusive.

Les erreurs de lieu d'articulation en position intervocalique qui indiquent que les bilabiales sont plus sensibles à la compression du voisement que les alvéolaires pourraient s'expliquer par une interaction entre la durée de l'occlusion et un indice de lieu d'articulation (Tartter, Kat, Samuel, & Repp, 1983). En effet, la transition CV joue un rôle majeur dans l'identification du lieu d'articulation de la consonne lorsque la durée de l'occlusion est réduite. Nous reviendrons sur cette interaction dans l'Expérience 3 et dans la discussion générale.

2.3.3.4. Les occlusives non voisées

Les occlusives non voisées, plus particulièrement l'alvéolaire, présentent des erreurs de voisement, de lieu et des omissions. Pour les occlusives non voisées, l'indice temporel entre le début de l'explosion de la consonne et le début des oscillations périodiques (VOT) comprend plusieurs types d'informations acoustiques, notamment le bruit de l'explosion de l'occlusive (le burst) qui est un indice du lieu d'articulation (Stevens & Blumstein, 1978).

En position d'attaque, la majorité des erreurs sont des omissions pour l'occlusive bilabiale non voisée du fait d'une intensité de burst plus faible par rapport à l'intensité du burst des alvéolaires qui est plus forte. L'occlusive bilabiale non voisée possède une barre d'explosion et une friction faible donc elles auraient tendance à ne pas être perçues. Notre

perception dépend donc des indices acoustiques présents. De plus, nous pouvons penser que la redondance des indices est moins importante en attaque de mot. Au contraire, l'occlusive alvéolaire non voisée est le plus souvent confondue sur son lieu d'articulation. Les erreurs de lieu d'articulation rendent compte de la présence d'indices de lieu d'articulation dans le VOT (i. e. le burst).

Les erreurs de voisement en position intervocalique s'expliquent par le contexte vocalique prédominant qui voise la perception de l'occlusive non voisée, ce qui met en évidence des effets d'assimilation (Saerens, Serniclaes, & Beeckmans, 1989). Les phonèmes voisins, dans notre étude les voyelles, vont transférer leur trait vocalique à la consonne adjacente. Nous discuterons, plus en détail, de ce phénomène de redondance des traits et des phénomènes d'assimilation dans la discussion générale.

Cette première expérience a mis en évidence l'importance du trait de voisement des occlusives pour leur identification et la nature différente des deux indices acoustiques correspondant au voisement pour les occlusives voisées et non voisées. L'effet de la compression temporelle n'apparaît que lorsque la durée du signal atteint 25% de sa durée naturelle aussi bien pour les voisées que les non voisées. Nous reviendrons dans la discussion générale sur les explications possibles de ces effets sur les occlusives voisées et non voisées.

2.4. Expérience 2 : Compression temporelle du trait de lieu d'articulation

Dans la seconde Expérience, nous explorons les effets de la compression temporelle des transitions formantiques sur l'identification des occlusives labiales et alvéolaires.

2.4.1. Méthode

2.4.1.1. Stimuli et Procédure

Dans l'Expérience 2, nous avons raccourci uniquement la durée des transitions des formants. La compression temporelle suit les mêmes conditions expérimentales que dans l'Expérience 1. Les stimuli et le déroulement des expériences étaient les mêmes que pour l'Expérience 1.

2.4.1.2. Participants

Quarante-quatre participants, âgés de 19 à 39 ans, ont participé à cette expérience (13 hommes, moyenne d'âge = 22.2 ans, écart-type = 5.2). Tous les participants étaient de langue maternelle française et n'avaient jamais connu aucun trouble auditif, du langage, ou neurologique. De plus, aucun d'entre eux n'avait participé à l'Expérience 1.

2.4.1.3. Plan expérimental

Le plan expérimental pour l'Expérience 1 est $S_{44} * I_8 <P_2 * C_4>$ avec :

S : les Sujets au nombre de 44.

I : les Items présentés (2 fois) au nombre de 8 par conditions (/ba/, /bi/, /da/, /di/, /pa/, /pi/, /ta/, /ti/).

P : la variable Position à deux modalités : consonne d'attaque et intervocalique.

C : la variable taux de Compression des items à quatre modalités : 100, 50, 25 et 0%.

Les variables indépendantes (VI) sont toutes les deux des variables intra-sujets. Il s'agit des facteurs Position et taux d'Accélération. La variable dépendante (VD) correspond aux taux de restitution correcte des sujets (%).

2.4.2. Résultats

Un test t sur échantillons appariés a permis de comparer les moyennes pour chaque phonème (C_1 , V_1 , C_2 et V_2). Ce test a mis en évidence un effet de position pour les consonnes. Une différence significative a été observée pour les consonnes mais pas pour les voyelles ($C : t_{44} = -8.70 ; p < .001$ et $V : t_{44} = -1.77 ; n.s.$). Le Tableau 4 comporte les taux d'identification correcte des phonèmes et des pseudo-mots. Globalement, les voyelles sont, comme dans l'Expérience 1, les phonèmes les mieux rappelées par rapport aux consonnes (99.9% vs. 96.7%). La consonne en position intervocalique est significativement mieux identifiée que la consonne en position d'attaque (98.5%, $\sigma = 3$ vs. 94.8%, $\sigma = 1.6$).

Tableau 4 : Pourcentages d'identification correcte des phonèmes et des pseudo-mots pour les 2^{èmes} expériences (%) quel que soit le taux de compression. Résultats des t tests sur échantillons appariés : effets de Position de la consonne dans le pseudo-mot (***) $p < .001$ et * $p < .05$).

		C_1	V_1	C_2	V_2	CVCV	p
Expérience 1	Voisement	88	99.7	89.6	99.8	79.1	*
Expérience 2	Transitions	94.8	99.9	98.5	100	93.3	***

2.4.2.1. ANOVA mixte

Comme pour l'Expérience 1, nous procédons à deux analyses séparées des occlusives selon leur lieu d'articulation : bilabiale ou alvéolaire. Contrairement à l'Expérience 1, le traitement sur les transitions est le même mais les transitions sont différentes donc nous avons choisi de les étudier séparément.

Les occlusives bilabiales

Une ANOVA mixte à deux facteurs : la Position des consonnes (C_1 , C_2) et les taux de Compression de la TF2 (100, 50, 25 et 0%) a présenté deux effets principaux significatifs de la Position des consonnes dans le pseudo-mot [$F(1,2762) = 6.79 ; p < .01$] et des taux de Compression [$F(3,2762) = 7.06 ; p < .001$]. Un test de comparaison de Bonferroni a permis de montrer que la consonne intervocalique a un taux d'identification correcte significativement plus élevé que la consonne d'attaque (99.4% vs. 98.4%). De plus, il est important de noter qu'il n'y pas d'effet de la compression temporelle sur le trait de lieu d'articulation (50% = 99.6% et 25% = 99.6% par rapport à la condition naturelle, 100% = 99.1% ; n.s.). Les performances diminuent significativement lorsque le trait est totalement

supprimé (97.4% ; $p < .05$ pour toutes les comparaisons). De plus, il existe un effet d'interaction significatif entre la Position et les taux de Compression [$F(3,2765) = 3.19$; $p < .05$]. Des comparaisons par paire montrent qu'en position d'attaque, il n'y a pas d'effet de la compression temporelle, la baisse d'intelligibilité est significative uniquement dans la condition 0% (98.6%, 99.4%, 99.7% vs. 96% ; $p < .01$ pour toutes les comparaisons) (Figure 19). Aucun effet des conditions n'est observé en position intervocalique. Un effet de Position est mis en évidence pour la condition 0% : le taux d'identification correcte est supérieur en position intervocalique qu'en position d'attaque (98.9% vs. 96%, $p < .001$).

Les occlusives alvéolaires

Une ANOVA mixte à deux facteurs : la Position des consonnes (C_1 , C_2) et les taux de Compression de la TF2 (100, 50, 25 et 0%) a présenté deux effets principaux significatifs de la Position des consonnes dans le pseudo-mot [$F(1,2762) = 64.08$; $p < .001$] et des taux de compression [$F(3,2762) = 64$; $p < .001$]. Un test de comparaison de Bonferroni a permis de montrer que la consonne intervocalique a un taux d'identification correcte significativement plus élevé que la consonne d'attaque (97.7% vs. 91.2%). De plus, il est important de noter qu'il n'y a pas d'effet de la compression temporelle sur le trait de lieu d'articulation (50% = 98.3% et 25% = 96.6% par rapport à la condition naturelle, 100% = 98% ; n.s.). Encore une fois, les performances diminuent significativement lorsque le trait est totalement supprimé (84.8% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). De plus, il existe un effet d'interaction significatif entre la Position et les taux de Compression [$F(3,2765) = 14.89$; $p < .001$]. Des comparaisons par paire montrent que dans les deux positions, il n'y a pas d'effet de la compression temporelle, la baisse d'intelligibilité est significative uniquement dans la condition 0% (en C_1 : 96.6%, 97.2%, 94% vs. 77% et en C_2 : 99.4%, 99.4%, 99.1% vs. 92.6% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons) (Figure 19). Un effet de Position est mis en évidence pour les conditions 25% et 0% : le taux d'identification correcte est supérieur en position intervocalique qu'en position d'attaque (25 % : 99.1% vs. 94%, $p < .01$; 0% : 92.6% vs. 77%, $p < .001$).

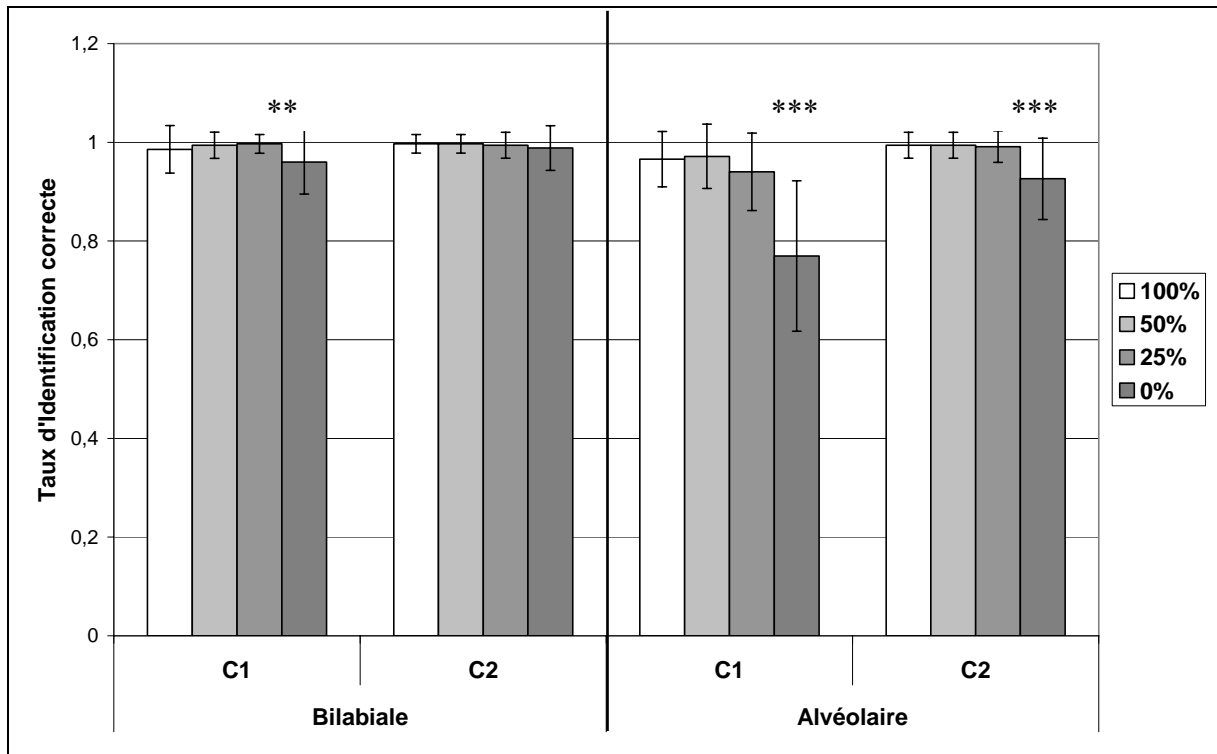


Figure 19 : Performances d'identification des occlusives bilabiales et alvéolaires, selon la Position (C1 et C2) et le taux de Compression (100, 50, 25 et 0%) (** $p < .01$, *** $p < .001$).

2.4.2.2. Analyse qualitative des erreurs

Les matrices de confusion des occlusives indiquent les erreurs faites par les participants en position d'attaque et en position intervocalique (Tableau 5).

Les occlusives bilabiales

en position d'attaque

Les erreurs sont peu nombreuses (1.6%) et touchent principalement la non voisée /p/ qui est confondue avec /b/ ou omise à 0% seulement.

en position intervocalique

En position intervocalique, le nombre d'erreurs est encore plus faible qu'en début de mot (0.6%).

Tableau 5 : Matrices de confusion de l'Expérience 2 (N = 176).

		C₁									
100%		b	d	p	t	k					
b		176									
d		1	173		2						
p		3		171	2						
t			1	7	167	1					
50%		b	d	p	t						
b		175	1								
d		3	169		4						
p		1		175							
t			1	2	173						
25%		b	d	p	t	k	g	ø			
b		176									
d		11	164				1				
p				175	1						
t			2	3	167	1				3	
0%		b	d	g	p	t	ø				
b		174	1				1				
d		52	118	1			1	4			
p		3			164	2	7				
t			1		5	153	17				
		C₂									
100%		b	d	p	t						
b		176									
d		2	174								
p		1		175							
t					176						
50%		b	d	p	t	ø					
b		176									
d		2	174								
p				175		1					
t					176						
25%		b	d	p	t	ø					
b		175				1					
d		2	173			1					
p		1		175							
t					176						
0%		b	d	p	t	l	v	g	ø		
b		174	1						1		
d		9	157	1		2	1	1	5		
p				174	1				1		
t				4	169				3		

Les occlusives alvéolaires

en position d'attaque

Le taux d'erreurs est plus important pour les alvéolaires que pour les bilabiales (8.7%). Les erreurs observées sont des confusions sur le lieu d'articulation. Les consonnes alvéolaires sont confondues avec des consonnes bilabiales (/d/ -> /b/ et /t/ -> /p/), sans erreur sur le voisement. Ces confusions se retrouvent dans les différentes conditions de compression et de suppression du trait (57.5%). Nous remarquons, lors d'une analyse, selon la voyelle qui suit dans CV, que pour l'alvéolaire non voisée, les omissions sont plus nombreuses que les confusions avec la voyelle /a/ (59.4%).

en position intervocalique

Les erreurs sont moins nombreuses (2.3%) mais nous retrouvons les confusions sur le lieu d'articulation qui conduisent à la confusion des consonnes alvéolaires avec des bilabiales (51.2%). Le nombre d'erreurs est plus important lorsque la durée des transitions est supprimée à la condition 0%. Dans notre analyse sur les voyelles, nous observons quasiment uniquement des confusions avec la voyelle /a/ quel que soit le voisement de la consonne.

2.4.3. Discussion

Dans l'Expérience 2, nous avons compressé la durée des transitions formantiques. Nous avons distingué les occlusives selon leur lieu d'articulation : les bilabiales et les alvéolaires.

2.4.3.1. L'effet de Position

Les résultats ont montré que quel que soit le lieu d'articulation, les occlusives sont mieux identifiées en position intervocalique qu'en position d'attaque. La différence entre les deux positions est plus marquée pour les alvéolaires du fait, notamment, du très faible nombre d'erreurs sur les bilabiales. En position intervocalique, la redondance des indices acoustiques pourrait jouer un rôle dans l'identification des consonnes. Öhman (1966, p. 165) explique cet effet de position par les informations apportées par la voyelle précédente (transitions) : « *We have clear evidence that the stop-consonant gestures are actually superimposed on a context-dependent vowel substrate that is present during all of the consonantal gesture* » (cité par Carré & Chennoukh, 1995). Pendant la transition VC, les gestes articulatoires de la consonne

sont anticipés et les informations transitionnelles précédentes faciliteraient l'identification de cette consonne si les informations dans la transition CV sont altérées.

2.4.3.2. L'effet de la Compression temporelle

Pour les deux types d'occlusives, la compression temporelle de la durée des transitions n'a aucun effet sur l'identification du lieu d'articulation. Seule la suppression des transitions induit une baisse du taux d'identification qui est plus marquée également pour les alvéolaires (14%) que pour les bilabiales (2%). Mais le nombre d'erreurs est trop faible pour conclure sur les effets de la compression temporelle de la TF2. Ces résultats montrent deux phénomènes : le premier est que la durée de la transition, même très courte, suffit à identifier correctement le lieu d'articulation de l'occlusive. Le second phénomène est que, comme nous venons de l'exposer dans la section précédente, les informations portées par la voyelle précédente permettent une bonne identification des occlusives. En position d'attaque, seul le premier phénomène intervient alors que les deux jouent un rôle en position intervocalique. Comme pour l'effet de Position, l'identification des bilabiales est plus résistante à la suppression des transitions que les alvéolaires qui présentent plus d'erreurs.

2.4.3.3. L'effet du lieu d'articulation

Les erreurs faites sur l'identification des alvéolaires sont principalement des erreurs sur le lieu d'articulation aussi bien en position d'attaque qu'en position intervocalique. La compression temporelle des transitions conduit à modifier la pente des transitions qui mène à une ambiguïté au niveau des zones transitionnelles. Comme nous le verrons dans l'analyse acoustique (voir section 2.7.2.2), la pente des transitions des occlusives alvéolaires en position intervocalique est plus raide que celle des bilabiales alors que la tendance inverse est observée en attaque. Cette caractéristique de la pente de la transition du F2 semble refléter les résultats comportementaux : plus la pente est raide, meilleures sont les résultats. En effet, en position d'attaque, la pente des bilabiales a tendance à être plus raide que celle des alvéolaires (même si ce n'est pas significatif) ce qui corrèle avec le nombre très faible d'erreurs en attaque sur les bilabiales. Nous avons déjà abordé ce point dans le Chapitre 1 (section 1.3.2., voir la Figure 7) : plus la pente est raide et plus elle est saillante acoustiquement, donc informative, ce qui lui permet de contrôler la discrimination de la consonne. Un changement fréquentiel rapide de grande amplitude de la transition permet une meilleure identification c'est-à-dire que la différence de fréquentielle entre le début et la fin de la transition est plus grande facilitant ainsi la discrimination. Selon Jun (1995), le lieu d'articulation bilabial est celui que l'on

retrouve de manière plus fiable dans le bruit à travers la position dans la syllabe (attaque et coda). Dans une tâche à choix forcé entre /b/, /d/ et /g/, les résultats montrent un avantage général de perception en attaque. /d/ ne montre pas d'avantage de la position en attaque par rapport à /b/ et /g/. Il faut noter qu'en coda, la confusion /d/ -> /b/ est importante dans des conditions de bruit. En attaque, l'auditeur se fie aux indices du relâchement du burst pour les alvéolaires et donc la dégradation de ces indices touche plus le /d/ que les autres stimuli. Le burst du /d/ a une intensité plus forte et moins de variabilité entre les voyelles que /b/ ou /g/ (Ohala, 1990 ; cité par Wright, 2001). Nos résultats peuvent être mis en lien avec cette étude car les alvéolaires sont les plus affectées par la compression temporelle des transitions. Cet effet est, cependant, plus marqué en position d'attaque. En position intervocalique, d'autres mécanismes doivent intervenir pour expliquer la baisse des confusions sur le lieu d'articulation des alvéolaires.

Par ailleurs, l'analyse d'identification des consonnes selon la voyelle qui suit a mis en évidence un effet de la voyelle /a/ derrière l'occlusive alvéolaire non voisée en position d'attaque. Les omissions étaient plus fréquentes avec /a/ qu'avec /i/. Ce résultat s'explique par le fait que le bruit d'explosion du /t/ va dépendre de la voyelle qui suit : avec /i/, il y a du bruit alors qu'il n'y en a pas avec /a/. Par conséquent, /ta/ a tendance à ne pas être perçu et /ti/ à être confondu.

Dans cette Expérience 2, nous n'avons donc pas observé d'effet de la compression temporelle des transitions formantiques sur l'identification des occlusives. La suppression de ce trait, cependant, induit une baisse d'intelligibilité des occlusives, plus particulièrement, des alvéolaires. Les bilabiales sont donc plus robustes à cette suppression d'indice de lieu d'articulation. Nous reviendrons dans la discussion générale sur ces différences entre les occlusives bilabiales et alvéolaires.

2.5. Expérience 3 : Compression temporelle des deux traits

Dans cette troisième Expérience, nous explorons la relation qu'entretiennent les deux traits acoustiques, en les manipulant conjointement.

2.5.1. Méthode

2.5.1.1. Stimuli et Procédure

Dans l'Expérience 3, nous avons compressé les durées des deux traits : de voisement et de lieu d'articulation. La compression temporelle suit les mêmes conditions expérimentales que dans l'Expérience 1. Le même taux de compression est appliqué simultanément aux deux indices acoustiques. Les stimuli et le déroulement des expériences étaient les mêmes que pour l'Expérience 1.

2.5.1.2. Participants

Trente-deux personnes, âgées de 18 à 32 ans, ont participé à cette expérience (10 hommes, moyenne d'âge = 24.4 ans, écart-type = 3.2). Tous les participants étaient de langue maternelle française et n'avaient jamais connu aucun trouble auditif, du langage, ou neurologique. De plus, aucun d'entre eux n'avait participé aux Expériences 1 et 2.

2.5.1.3. Plan expérimental

Le plan expérimental pour l'Expérience 1 est $S_{32} * I_8 < P_2 * C_4 >$ avec :

S : les Sujets au nombre de 32.

I : les Items présentés (2 fois) au nombre de 8 par conditions (/ba/, /bi/, /da/, /di/, /pa/, /pi/, /ta/, /ti/).

P : la variable Position à deux modalités : consonne d'attaque et intervocalique.

C : la variable taux de Compression des items à quatre modalités : 100, 50, 25 et 0%.

Les variables indépendantes (VI) sont toutes les deux des variables intra-sujets. Il s'agit des facteurs Position et taux d'Accélération. La variable dépendante (VD) correspond aux taux de restitution correcte des sujets (%).

2.5.2. Résultats

Un test t sur échantillons appariés a permis de comparer les moyennes pour chaque phonème (C_1 , V_1 , C_2 et V_2). Ce test nous a permis d'observer un effet de position. Une différence significative a été observée pour les consonnes mais pas pour les voyelles (C : $t_{32} = -5.38$; $p < .001$ et V : $t_{32} = -0.72$; n.s.). Le Tableau 6 comporte les taux d'identification correcte des phonèmes et des pseudo-mots. Globalement, les voyelles sont les phonèmes les mieux rappelées par rapport aux consonnes (99% vs. 73.7%). La consonne en position intervocalique est significativement mieux identifiée que la consonne en position d'attaque (77%, $\sigma = 6.6$ vs. 70.4%, $\sigma = 7.3$). Nous remarquons, dans cette Expérience, une importante variabilité interindividuelle.

Tableau 6 : Pourcentages d'identification correcte des phonèmes et des pseudo-mots pour les 3èmes expériences (%) quel que soit le taux de compression. Résultats des t tests sur échantillons appariés : effets de Position de la consonne dans le pseudo-mot (*** $p < .001$ et * $p < .05$).

		C_1	V_1	C_2	V_2	CVCV	p
<i>Expérience 1</i>	<i>Voisement</i>	88	99.7	89.6	99.8	79.1	*
<i>Expérience 2</i>	<i>Transitions</i>	94.8	99.9	98.5	100	93.3	***
Expérience 3	Voisement + Transitions	70.4	98.9	77	99.1	55.4	***

2.5.2.1. La variabilité interindividuelle

Globalement, les scores d'identification des participants varient entre 25 et 96.9%, toutes positions confondues au taux de compression à 25% (Figure 20). La variabilité interindividuelle la plus importante est observée pour la condition de compression à 25% (100%, $\sigma = 1.9$; 50%, $\sigma = 5.4$; 25%, $\sigma = 13$; 0%, $\sigma = 9.4$). L'écart-type important est dû principalement aux résultats d'un unique participant en marge des autres. Cependant, l'écart-type à 25% reste le plus important si nous enlevons ce sujet (100%, $\sigma = 1.8$; 50%, $\sigma = 4.8$; 25%, $\sigma = 9.5$; 0%, $\sigma = 8.6$). Nous reviendrons sur ce résultat dans le Chapitre 3.

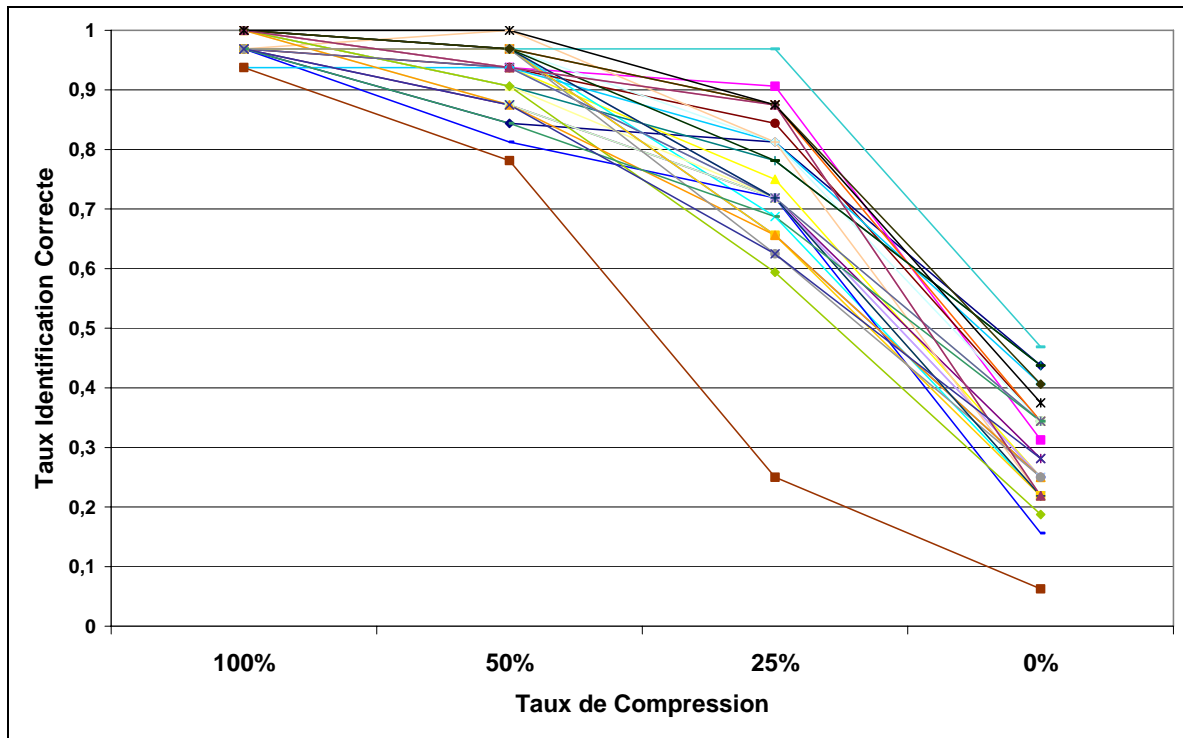


Figure 20 : Effet des taux de compression temporelle sur l'identification des consonnes toutes positions confondues (chaque courbe représente les performances d'un participant).

2.5.2.2. ANOVA mixte

Nous procédons aux analyses séparées des consonnes selon leur voisement et leur lieu d'articulation. Nous distinguons donc 4 combinaisons : [+ voisée ; + bilabiale], [+ voisée ; + alvéolaire], [- voisée ; + bilabiale] et [- voisée ; + alvéolaire]. Cette analyse nous permet d'observer si les traits interagissent l'un sur l'autre.

L'occlusive bilabiale voisée [+ voisée ; + bilabiale]

Une ANOVA mixte à deux facteurs : la Position des consonnes (C_1 , C_2) et les taux de Compression des deux indices (100, 50, 25 et 0%) a présenté deux effets principaux significatifs de la Position des consonnes dans le pseudo-mot [$F(1,985) = 124.80$; $p < .001$] et des taux de Compression [$F(3,985) = 300.19$; $p < .001$]. Un test de comparaison de Bonferroni a permis de montrer que la consonne bilabiale voisée en position d'attaque a un taux d'identification correcte significativement plus élevé qu'en position intervocalique (87.1% vs. 67.2%). De plus, il existe un effet de la compression temporelle à 25% mais pas à 50% par rapport à la condition naturelle (100% = 99.6%, 50% = 96.9%, 25% = 79.3% et 0% = 32.8%). Les performances diminuent significativement lorsque les deux traits sont totalement supprimés ($p < .001$ pour toutes les comparaisons). De plus, il existe un effet d'interaction significatif entre la Position et les taux de Compression [$F(3,985) = 38.21$;

$p < .001$]. Des comparaisons par paire montrent qu'en position d'attaque, il n'y a pas d'effet de la compression temporelle, la baisse d'intelligibilité est significative uniquement dans la condition 0% (100%, 97.7%, 96.1% vs. 54.7% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Alors qu'en position intervocalique, un effet de la compression est significatif à 25% (99.2%, 96.1% vs. 62.5% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Le taux d'identification correcte baisse encore plus significativement à 0% (10.9% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Un effet de Position est mis en évidence aux conditions 25% et 0% : le taux d'identification correcte est supérieur en position d'attaque qu'en position intervocalique (25% : 96.1% vs. 62.5%, $p < .001$ et 0% : 54.7% vs. 10.9%, $p < .001$) (Figure 21).

L'occlusive alvéolaire voisée [+ voisée ; + alvéolaire]

Une ANOVA mixte à deux facteurs : la Position des consonnes (C_1 , C_2) et les taux de Compression des deux traits (100, 50, 25 et 0%) a présenté un effet principal significatif des taux de Compression [$F(3,984) = 236.30$; $p < .001$] mais pas de la Position des consonnes dans le pseudo-mot [$F(1,984) = 2.74$; $p = 0.1$]. Un test de comparaison de Bonferroni a permis de montrer qu'il existe un effet de la compression temporelle à 25% mais pas à 50% par rapport à la condition naturelle (100% = 98.4%, 50% = 97.3%, 25% = 86.7% et 0% = 37.1%). Les performances diminuent significativement lorsque les deux traits sont totalement supprimés ($p < .001$ pour toutes les comparaisons). Par contre, les performances d'identification ne sont pas significativement différentes selon la position de la consonne dans le pseudo-mot ($C_1 = 81.4\%$ et $C_2 = 78.3\%$). De plus, il existe un effet d'interaction significatif entre la Position et les taux de Compression [$F(3,984) = 2.77$; $p < .05$]. Des comparaisons par paire montrent qu'en position d'attaque, il n'y a pas d'effet de la compression temporelle, la baisse d'intelligibilité est significative uniquement dans la condition 0% (96.9%, 97.7%, 88.3% vs. 43% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Alors qu'en position intervocalique, un effet de la compression est significatif à 25% (100%, 96.9% vs. 85.2% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Le taux d'identification correcte baisse encore plus significativement à 0% (31.3% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Un effet de Position est mis en évidence à la condition 0% : le taux d'identification correcte est supérieur en position d'attaque qu'en position intervocalique (43% vs. 31.3%, $p < .01$) (Figure 21).

L'occlusive bilabiale non voisée [- voisée ; + bilabiale]

Une ANOVA mixte à deux facteurs : la Position des consonnes (C_1 , C_2) et les taux de Compression des deux traits (100, 50, 25 et 0%) a présenté deux effets principaux significatifs

de la Position des consonnes dans le pseudo-mot [$F(1,984) = 264.28$; $p < .001$] et des taux de Compression [$F(3,984) = 168.06$; $p < .001$]. Un test de comparaison de Bonferroni a permis de montrer que la consonne bilabiale non voisée en position intervocalique a un taux d'identification correcte significativement plus élevé qu'en position d'attaque (90.6% *vs.* 58.4%). Le test a également mis en évidence un effet des taux de compression temporelle à 50% et à 25% par rapport à la condition naturelle (100% = 97.3%, 50% = 87.9%, 25% = 74.2% et 0% = 38.7% ; $p < .01$ pour toutes les comparaisons). Les performances diminuent significativement lorsque les deux traits sont totalement supprimés ($p < .001$ pour toutes les comparaisons). De plus, il existe un effet d'interaction significatif entre la Position et les taux de Compression [$F(3,984) = 30.14$; $p < .001$]. Des comparaisons par paire montrent qu'en position d'attaque, il y a des effets de la compression temporelle à 50% et 25% (94.5% *vs.* 75.8% *vs.* 51.6% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Le taux d'identification correcte baisse encore plus significativement à 0% (11.7% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Alors qu'en position intervocalique, il n'y a pas d'effet de la compression temporelle, la baisse d'intelligibilité est significative uniquement dans la condition 0% (100%, 100%, 96.9% *vs.* 65.6% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Un effet de Position est mis en évidence aux conditions 50%, 25% et 0% : le taux d'identification correcte est supérieur en position intervocalique qu'en position d'attaque ($p < .001$) (Figure 21).

L'occlusive alvéolaire non voisée [- voisée ; + alvéolaire]

Une ANOVA mixte à deux facteurs : la Position des consonnes (C_1, C_2) et les taux de Compression des deux traits (100, 50, 25 et 0%) a présenté deux effets principaux significatifs de la Position des consonnes dans le pseudo-mot [$F(1,984) = 81.47$; $p < .001$] et des taux de Compression [$F(3,984) = 454.49$; $p < .001$]. Un test de comparaison de Bonferroni a permis de montrer que la consonne alvéolaire non voisée en position intervocalique a un taux d'identification correcte significativement plus élevé qu'en position d'attaque (71.9% *vs.* 54.7%). Le test a également souligné l'effet des taux de compression temporelle à 50% et à 25% par rapport à la condition naturelle (100% = 98.4%, 50% = 88.7%, 25% = 57.8% et 0% = 8.2% ; $p < .01$ pour toutes les comparaisons). Les performances diminuent significativement lorsque les deux traits sont totalement supprimés ($p < .001$ pour toutes les comparaisons). De plus, il existe un effet d'interaction significatif entre la Position et les taux de Compression [$F(3,984) = 14.67$; $p < .001$]. Des comparaisons par paire montrent qu'en position d'attaque, il y a des effets de la compression temporelle à 50% et 25% (96.9% *vs.*

78.1% vs. 39.8% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Le taux d'identification correcte baisse encore plus significativement à 0% (3.9% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). De même, en position intervocalique, nous avons des effets de la compression temporelle à 25% (100%, 99.2% vs. 75.8% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Le taux d'identification correcte baisse encore plus significativement à 0% (12.5% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Un effet de Position est mis en évidence aux conditions 50%, 25% et 0% : le taux d'identification correcte est supérieur en position intervocalique qu'en position d'attaque ($p < .001$) (Figure 21).

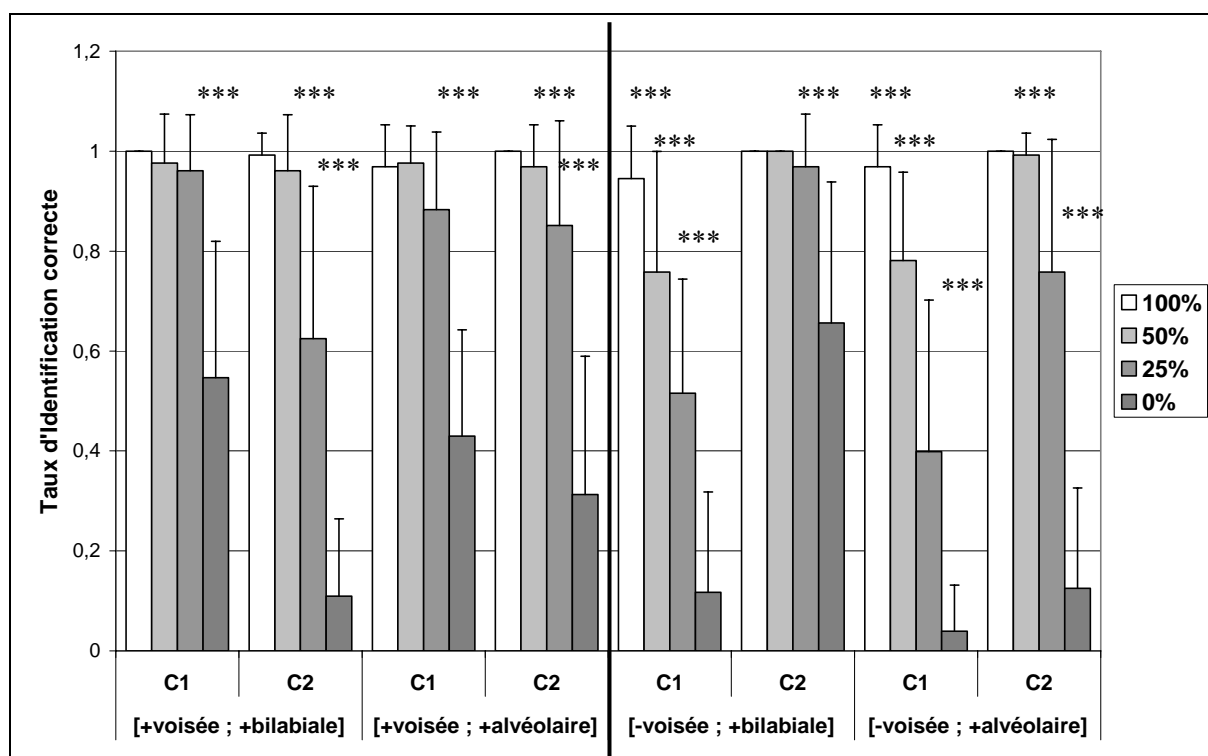


Figure 21 : Performances d'identification des occlusives selon la Position (C1 et C2) et le taux de Compression (100, 50, 25 et 0%) (***) $p < .001$.

2.5.2.3. Analyse qualitative des erreurs

Globalement, dans cette expérience, les erreurs sont plus nombreuses que dans les Expériences 1 et 2 du fait d'un taux d'omissions plus élevé (Figure 22 et Figure 23). Dans les conditions où les erreurs sont les plus nombreuses, à 25% et 0% (ou 10% pour l'Expérience 4), le nombre d'omissions augmente dans l'Expérience 3 et avec le taux de compression. Cet effet augmente encore dans l'Expérience 4 lorsque le signal entier est compressé de manière homogène.

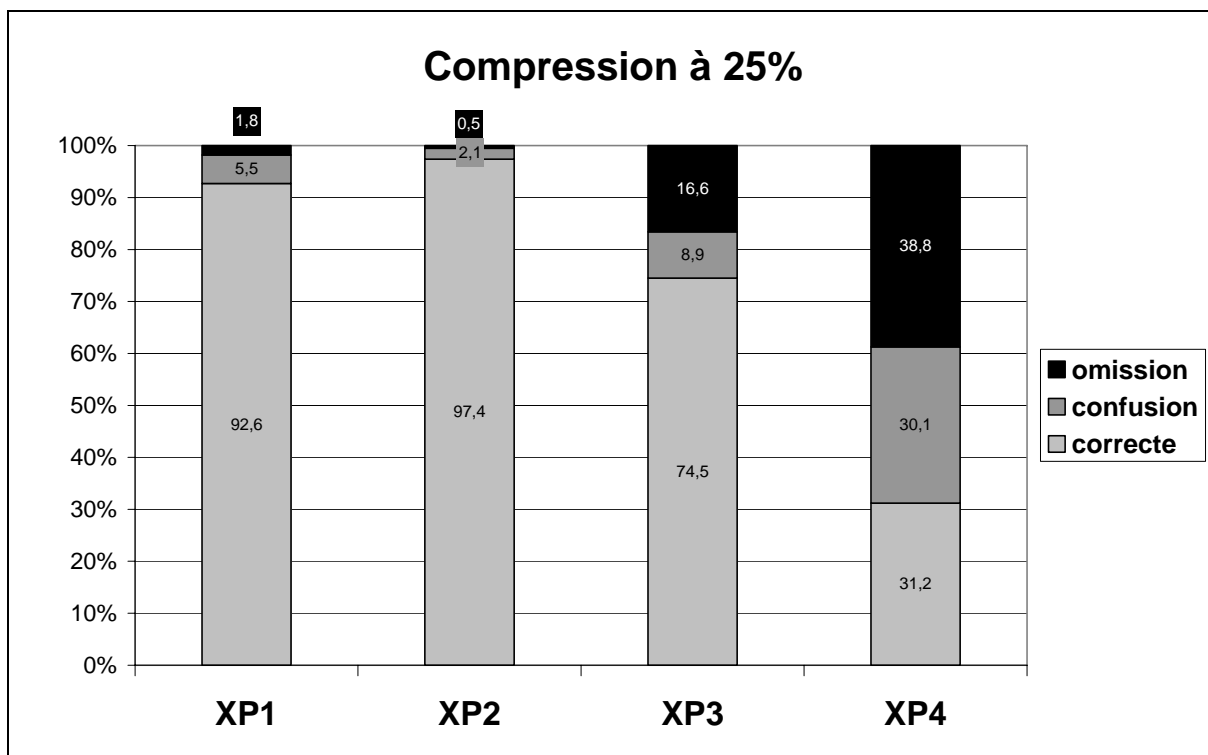


Figure 22 : Comparaison des pourcentages d'identification correcte des consonnes et des erreurs d'identification (confusion ou omission), au taux de compression à 25%, entre les 4 expériences.

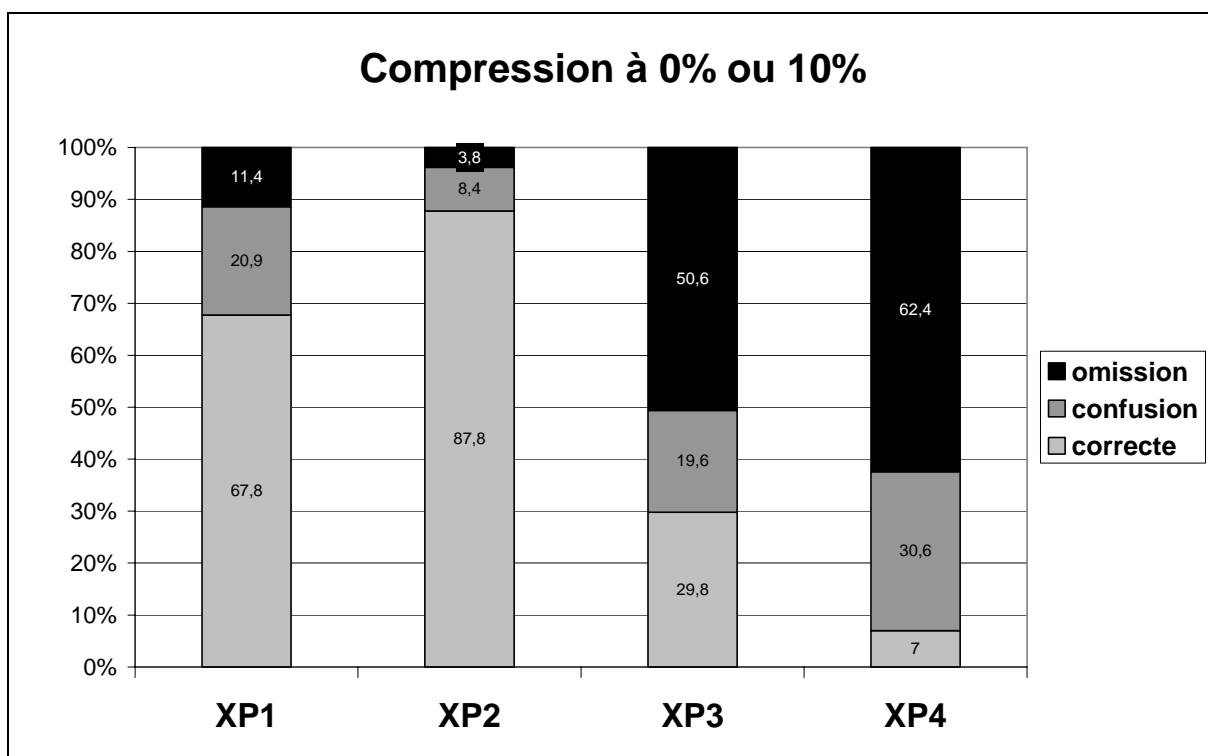


Figure 23 : Comparaison des pourcentages d'identification correcte des consonnes et des erreurs d'identification (confusion ou omission), au taux de compression à 0% (ou 10% dans l'Expérience 4), entre les 4 expériences.

Les matrices de confusion des occlusives présentent les erreurs faites par les participants en position d'attaque et en position intervocalique (Tableau 7).

En position d'attaque

Les occlusives non voisées sont en majorité omises (> 80%) et ce, dès la compression à 50% : les participants ne rappellent alors aucune consonne. Pour les occlusives non voisées, les confusions faites dans les deux premières expériences sont moins courantes dans l'Expérience 3. Pour les occlusives voisées, la bilabiale est majoritairement omise (59.1%), contrairement à l'alvéolaire qui est confondue (58.5%). Les différents types d'erreurs observés dans les Expériences 1 et 2 se retrouvent dans cette Expérience 3. Nous retrouvons, dès la compression à 25%, les erreurs de voisement observées dans l'Expérience 1 (p. ex. /d/ -> /t/) et les erreurs sur le lieu d'articulation de l'Expérience 2 (p. ex. /d/ -> /b/). Remarquons que pour la bilabiale, il existe un effet de la voyelle suivante sur son identification : /bi/ est majoritairement omis à 70.6% alors que /ba/ est confondu (53.1%), le plus souvent avec /pa/.

En position intervocalique

Comme en position d'attaque, les occlusives non voisées sont la plupart du temps omises : les participants ne rappellent aucune consonne (> 80%) et pour les occlusives voisées, la bilabiale est majoritairement omise (53.6%), contrairement à l'alvéolaire qui est confondue (51.9%). Pour les occlusives voisées, les différents types d'erreurs observés dans les Expériences 1 et 2 se retrouvent dans cette Expérience 3. Nous retrouvons les erreurs sur le lieu d'articulation observées dans l'Expérience 1 et celles de l'Expérience 2 (p. ex. /b/ -> /d/ ou /b/ -> /l, r/). Mais nous observons également plus d'occlusives voisées non identifiées notamment les /b/. En effet, pour la bilabiale voisée, il existe un effet de la voyelle suivante sur son identification : /bi/ est majoritairement confondu (69.1%) alors que /ba/ est omis (74.7%). Le même effet est obtenu pour /d/ mais de manière moins marquée (/di/ : 60.5% de confusions et /da/ : 52.9% d'omissions).

Tableau 7 : Matrices de confusion de l'Expérience 3 (N = 128 = 32 sujets x 2V x 2 répétitions).

		C₁							
100%	b	d	p	t	k	ø			
b	128								
d		124		4					
p	1		121	1			5		
t		1	1	124	2				
50%	b	d	p	t	ø				
b	125	2			1				
d	1	125			2				
p	3	1	97	1	26				
t	1	7	5	100	15				
25%	b	d	p	t	k	z	ø		
b	123	2	1				2		
d	7	113		6		1	1		
p	10		66	2			50		
t		7	11	51	1		58		
0%	b	d	g	p	t	k	m	n	ø
b	71	2		18			1		36
d	16	55	1	5	12			3	36
p	4			15	6	1			102
t	1	2		9	5				111

		C₂							
100%	b	d	p	t					
b	127	1							
d		128							
p			128						
t				128					
50%	b	d	p	t	l	ø			
b	123					5			
d		124				2	2		
p			128						
t			1	127					
25%	b	d	p	t	l	r	v	ø	
b	80	7	1		8	3	1	28	
d	1	109		2	6	2		8	
p			124					4	
t		3	9	97				19	
0%	b	d	p	t	l	r	v	m	ø
b	14	6	3		42	6		1	56
d	1	40	3		30	7	1		46
p	3	1	84	1					39
t	1	9	10	16					92

2.5.3. Discussion

Globalement, la compression temporelle des deux indices acoustiques : le voisement et les transitions, ont pour conséquence des omissions massives des consonnes. Le nombre de confusion augmente également. L'altération des deux traits phonétiques rend donc encore plus difficile l'identification des consonnes.

Dans cette Expérience 3, nous distinguons les effets sur les occlusives voisées, de ceux sur les occlusives non voisées, les occlusives non voisées étant moins résistantes que les voisées quelle que soit la position.

2.5.3.1. L'effet de la Position

Pour les deux occlusives voisées [+ bilabiale] et [+ alvéolaire], nous observons un effet de position différent de celui des occlusives non voisées [+ bilabiale] et [+ alvéolaire] qui montrent de meilleures performances en position intervocalique. L'occlusive [+ voisée ; + bilabiale] montre un effet inverse : les performances sont meilleures en attaque. Alors que l'occlusive [+ voisée ; + alvéolaire] ne montre pas d'effet de position, les performances sont équivalentes quelle que soit la position. Cette différence d'identification entre les occlusives voisées et non voisées, dépendante de la position, peut s'expliquer grâce au contexte acoustique dans lequel se réalise l'occlusive. En effet, le contexte acoustique en attaque d'un pseudo-mot correspond à du silence, contrairement au contexte de la position intervocalique, qui comme son nom l'indique, est voisée. Ainsi, une occlusive non voisée, caractérisée par une phase de silence pendant l'occlusion, ne va pas être acoustiquement saillante en attaque de mot. De même, pour une occlusive voisée, caractérisée par une barre de voisement pendant l'occlusion, en position intervocalique. Ces résultats indiquent clairement que les occlusives non voisées sont beaucoup moins intelligibles en attaque de mot que les voisées et, cet effet est très sensible à la compression temporelle.

2.5.3.2. L'effet de la Compression temporelle

Les occlusives non voisées sont sensibles à la réduction de moitié de la durée des deux indices acoustiques en attaque, mais pas en position intervocalique. Les performances chutent considérablement en position d'attaque dès la compression à 50%. Au contraire, les occlusives voisées ne sont pas sensibles à ce taux de compression temporelle (50%), ni en position intervocalique ni en position d'attaque. Ces résultats renforcent l'idée d'une sensibilité particulière des occlusives non voisées à la compression temporelle des deux traits phonétiques, en position d'attaque.

Une explication à ce résultat est que nous identifions la consonne selon les indices présents. Or, pour les occlusives non voisées, la compression temporelle dégrade le VOT et les transitions, ce qui conduit à une perte d'informations très importante (dont le burst). Par conséquent, nous ne percevons pas la consonne d'où le nombre d'omissions supérieur aux occlusives voisées. Quant aux occlusives voisées, la compression temporelle porte sur la barre de voisement et les transitions, mais un indice important n'est pas touché : le burst. Cet indice donne une information sur le lieu d'articulation de la consonne, d'où principalement des confusions sur le voisement en attaque ou sur le mode d'articulation en intervocalique. De plus, pour les occlusives voisées, nous avons montré des effets de la voyelle suivante sur l'identification de la consonne. Les omissions étaient supérieures aux confusions lorsque la pente de la transition du F2 était moins raide (entre /a/ et /i/). Par exemple, en attaque /bi/ était omis alors que /ba/ était majoritairement confondu. Or, en regardant les résultats de l'analyse acoustique (voir section 2.7.2.2), nous nous apercevons que la pente de la transition du F2 est moins raide avec la voyelle /i/. Comme nous l'avons déjà vu, une pente moins raide est moins informative donc la consonne a tendance à ne pas être perçue. Mêmes résultats, en position intervocalique pour /ba/ et /da/ qui sont plus souvent omis que /bi/ et /di/.

Cependant, un effet du taux de compression à 25% est observé pour les occlusives voisées en position intervocalique. Le taux d'identification correcte diminue davantage pour les bilabiales que pour les alvéolaires. Par contre, l'occlusive [+ voisée ; + bilabiale] est plus résistante en attaque, elle présente des performances encore supérieures à 50% d'identification correcte lorsque les deux traits sont supprimés en attaque. Nous discuterons cette résistance de l'occlusive bilabiale voisée en attaque dans la discussion générale.

2.5.3.3. La relation entre les deux traits

Comme nous venons de l'expliquer, les occlusives non voisées sont les plus sensibles à la compression temporelle et à la suppression des deux indices acoustiques. L'alvéolaire non voisée présente le plus grand nombre d'erreurs par rapport aux autres consonnes, c'est donc la consonne la moins bien identifiée. Elle est majoritairement omise c'est-à-dire non perçue par les participants. Ce résultat peut être mis en lien avec l'étude de Browman et Goldstein (1990, 1992) qui à débit rapide montre une élision complète du [t] final dans le mot « perfect ». Aucune impression auditive n'est perçue mais le geste articulatoire persiste cependant. Nous trouvons également une majorité d'élisions pour [t] dans des pseudo-mots CVCV. Les informations contenues dans le VOT (voisement, burst) et les transitions formantiques du /t/ semblent critiques pour une discrimination correcte. En effet, les erreurs du type /t/ est

confondu avec /d/ (confusion sur le voisement) ou /t/ est confondu avec /p/ (confusion sur le lieu d'articulation) sont les plus nombreuses quelle que soit la position. /t/ est également plus souvent confondu que /p/, ce qui s'explique par l'intensité du burst qui est plus faible pour /p/ et donc moins résistant. Le /p/ a donc tendance à ne pas être perçu.

L'occlusive qui possède les deux traits [- voisée ; + alvéolaire] rend compte de la vulnérabilité de l'association de ces deux indices en comparaison à l'occlusive [+ voisée ; + alvéolaire] qui ne présente pas d'effet de position et qui est sensible seulement à la compression temporelle à 25%. La différence est plus grande en attaque où l'occlusive /t/ est sensible à la compression à 50%, ce qui s'exprime sous la forme d'erreurs de voisement et de lieu d'articulation. Alors que les mêmes types d'erreurs sont observés pour l'occlusive /d/ mais seulement pour la compression à 25%. De même, l'association des traits [- voisée ; + bilabiale] est plus sensible en attaque que les deux traits [+ voisée ; + bilabiale]. Ces résultats mettent en évidence que l'identification du lieu d'articulation est possible chez les occlusives voisées grâce à la présence du bruit de l'explosion resté intact. La compression à la fois du VOT (i.e. burst) et des transitions pour les occlusives non voisées affecte considérablement leur identification, dans la plupart des cas, elles sont omises. La réduction temporelle des deux traits pour les occlusives non voisées induirait une quantité d'informations perdue trop importante pour y remédier. Ainsi, les résultats mettent en évidence le rôle primordial du burst dans l'identification du lieu d'articulation des occlusives.

Par ailleurs, au vue de la nature des erreurs faites dans cette expérience en comparaison avec les deux premières expériences, nous pouvons émettre l'hypothèse d'un traitement indépendant (en parallèle) des deux traits pour les occlusives voisées (pas d'effets additionnels) alors que des processus interactifs interviennent pour les occlusives non voisées (addition des effets des Expériences 1 et 2). Pour les occlusives voisées, nous retrouvons les mêmes erreurs que dans les Expériences 1 et 2, comme si les effets de la compression temporelle de chacun des indices s'ajoutaient indépendamment les uns des autres. Alors que pour les occlusives non voisées, les effets de la compression temporelle de chacun des indices conduisent à une altération trop importante de l'intelligibilité du signal acoustique, rendant impossible toute discrimination. Une relation interactive entre les deux traits est plus probable.

Dans cette troisième Expérience, nous avons mis en évidence une relation entre les deux traits qui est différente selon le caractère voisé ou non de l'occlusive. Le traitement des deux traits est indépendant pour les occlusives voisées alors qu'ils interagissent pour les non

voisées. La barre de voisement n'interagit pas avec les indices de lieu d'articulation alors que le VOT joue un rôle dans la discrimination du lieu d'articulation par l'intermédiaire du burst. Cette interprétation repose, principalement, sur la nature acoustique différente des traits manipulés.

2.5.3.4. La variabilité interindividuelle

Dans cette expérience, nous avons également remarqué la grande variabilité interindividuelle des taux d'identification pour les consonnes au taux de compression à 25%. Certains participants ne semblaient pas sensibles à la compression temporelle alors que d'autres, au contraire, étaient très gênés par la manipulation temporelle et montraient des scores d'identification très bas. Nous nous sommes donc posés la question des raisons de cette variabilité entre nos participants alors que nos participants avaient tous rapporté être normo-entendants et qu'ils avaient tous un niveau d'études supérieur au baccalauréat. Nous avons donc émis les hypothèses de corrélats auditifs et phonologiques pouvant expliquer cette variabilité. En effet, dans notre tâche auditive d'identification de pseudo-mots, des processus auditifs de bas niveau sont mis en jeu ainsi qu'un traitement phonologique du stimulus, de plus haut niveau. Nous explorerons donc les corrélats auditifs et phonologiques de la variabilité des performances d'identification auditive des pseudo-mots de nos participants dans le Chapitre 3.

2.6. Expérience 4 : Compression linéaire

Dans cette dernière expérience, nous examinons si le contexte acoustique plus large (les voyelles) a pu jouer un rôle de compensation dans les expériences précédentes. Pour cela nous compressons le signal entier de manière homogène afin d'affecter le contexte.

2.6.1. Méthode

2.6.1.1. Stimuli et Procédure

Dans l'Expérience 4, nous avons accéléré linéairement (de façon homogène) tout le signal de parole, ce qui comprend notamment les deux traits manipulés précédemment mais aussi tous les autres indices acoustiques. La compression temporelle suit les mêmes conditions expérimentales que dans les trois expériences précédentes, excepté pour la condition à 0% que nous avons remplacée par la condition de compression à 10%. En effet, la condition 0% entraînait la suppression totale du stimulus. Les stimuli et le déroulement des expériences étaient les mêmes que pour les trois expériences précédentes.

2.6.1.2. Participants

Trente-deux volontaires âgés, de 19 à 32 ans, ont participé à cette expérience (8 hommes, moyenne d'âge = 21 ans, écart-type = 2.7). Tous avaient le Français pour langue maternelle et aucun n'avait jamais connu aucun trouble auditif, du langage ou neurologique. De plus, aucun d'entre eux n'avait participé aux trois premières expériences.

2.6.1.3. Plan expérimental

Le plan expérimental pour l'Expérience 1 est $S_{32} * I_8 < P_2 * C_4 >$ avec :

S : les Sujets au nombre de 32.

I : les Items présentés (2 fois) au nombre de 8 par conditions (/ba/, /bi/, /da/, /di/, /pa/, /pi/, /ta/, /ti/).

P : la variable Position à deux modalités : consonne d'attaque et intervocalique.

C : la variable taux de Compression des items à quatre modalités : 100, 50, 25 et 10%.

Les variables indépendantes (VI) sont toutes les deux des variables intra-sujets. Il s'agit des facteurs Position et taux d'Accélération. La variable dépendante (VD) correspond aux taux de restitution correcte des sujets (%).

2.6.2. Résultats

Un test t sur échantillons appariés a permis de comparer les moyennes pour chacun des phonèmes (C_1 , V_1 , C_2 et V_2). Ce test a mis en évidence un effet de position. Une différence significative a été observée pour les consonnes mais pas pour les voyelles (C : $t_{32} = -2.09$; $p < .05$ et V : $t_{32} = -0.05$; n.s.). Le Tableau 8 comporte les taux d'identification correcte des phonèmes et des pseudo-mots. Globalement, les voyelles sont les phonèmes les mieux rappelées par rapport aux consonnes (92.6% vs. 53.9%). La consonne en position intervocalique est significativement mieux identifiée que la consonne en position d'attaque (55.2%, $\sigma = 6$ vs. 52.5%, $\sigma = 5.3$).

Tableau 8 : Pourcentages d'identification correcte des phonèmes et des pseudo-mots pour les 4 expériences (%) quel que soit le taux de compression. Résultats des t tests sur échantillons appariés : effets de Position de la consonne dans le pseudo-mot (***) $p < .001$ et * $p < .05$).

		C_1	V_1	C_2	V_2	CVCV	p
Expérience 1	Voisement	88	99.7	89.6	99.8	79.1	*
Expérience 2	Transitions	94.8	99.9	98.5	100	93.3	***
Expérience 3	Voisement + Transitions	70.4	98.9	77	99.1	55.4	***
Expérience 4	Compression linéaire	52.5	92.6	55.2	92.6	27.5	*

2.6.2.1. ANOVA mixte

Comme pour l'Expérience 3, nous procédons aux analyses séparées des consonnes selon leur voisement et leur lieu d'articulation. Nous distinguons donc 4 combinaisons : [+ voisée ; + bilabiale], [+ voisée ; + alvéolaire], [- voisée ; + bilabiale] et [- voisée ; + alvéolaire]. Cette analyse nous permet d'observer si les traits interagissent l'un sur l'autre.

L'occlusive bilabiale voisée [+ voisée ; + bilabiale]

Une ANOVA mixte à deux facteurs : la Position des consonnes (C_1 , C_2) et les taux de Compression linéaire (100, 50, 25 et 10%) a présenté deux effets principaux significatifs de la Position des consonnes dans le pseudo-mot [$F(1,984) = 12.59$; $p < .001$] et des taux de Compression [$F(3,984) = 421.17$; $p < .001$]. Un test de comparaison de Bonferroni a permis de montrer que la consonne bilabiale voisée en position d'attaque a un taux d'identification correcte significativement plus élevé qu'en position intervocalique (66.2% vs. 59.2%). Il est important de noter qu'il existe un effet des taux de compression temporelle à 50%, à 25% et à 10% par rapport à la condition naturelle (100% = 99.2%, 50% = 91.4%, 25% = 48.4% et

10% = 11.7% ; $p < .05$ pour toutes les comparaisons). De plus, il existe un effet d'interaction significatif entre la Position et les taux de Compression [$F(3,984) = 9.38$; $p < .001$]. Des comparaisons par paire montrent que, dans les deux positions, un effet de la compression est significatif à 25% (en C1 : 100%, 90.6% vs. 60.9% et en C2 : 98.4%, 92.2% vs. 35.9% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Le taux d'identification correcte baisse encore plus significativement à 10% (en C1 : 13.3% et en C2 : 10.2% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Un effet de Position est mis en évidence à la condition 25% : le taux d'identification correcte est supérieur en position d'attaque qu'en position intervocalique ($p < .001$) (Figure 24).

L'occlusive alvéolaire voisée [+ voisée ; + alvéolaire]

Une ANOVA mixte à deux facteurs : la Position des consonnes (C_1 , C_2) et les taux de Compression linéaire (100, 50, 25 et 10%) a présenté deux effets principaux significatifs de la Position des consonnes dans le pseudo-mot [$F(1,984) = 17.27$; $p < .001$] et des taux de Compression [$F(3,984) = 358.07$; $p < .001$]. Un test de comparaison de Bonferroni a permis de montrer que la consonne alvéolaire voisée en position intervocalique a un taux d'identification correcte significativement plus élevé qu'en position d'attaque (62.3% vs. 53.5%). Il est important de noter qu'il existe un effet des taux de compression temporelle à 50%, à 25% et à 10% par rapport à la condition naturelle (100% = 95.7%, 50% = 83.6%, 25% = 44.9% et 10% = 7.4% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). De plus, il existe un effet d'interaction significatif entre la Position et les taux de Compression [$F(3,984) = 5.83$; $p < .001$]. Des comparaisons par paire montrent qu'en position d'attaque, il y a des effets de la compression temporelle à 50%, 25% et 10% (98.4% vs. 74.2% vs. 39.1% vs. 2.3% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). De même, en position intervocalique, nous avons des effets de la compression temporelle à 25% et 10% (93%, 50.8% vs. 12.5% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Un effet de Position est mis en évidence aux conditions 50%, 25% et 10% : le taux d'identification correcte est supérieur en position intervocalique qu'en position d'attaque ($p < .05$) (Figure 24).

L'occlusive bilabiale non voisée [- voisée ; + bilabiale]

Une ANOVA mixte à deux facteurs : la Position des consonnes (C_1 , C_2) et les taux de Compression linéaire (100, 50, 25 et 10%) a présenté deux effets principaux significatifs de la Position des consonnes dans le pseudo-mot [$F(1,985) = 12.30$; $p < .001$] et des taux de Compression [$F(3,985) = 446.77$; $p < .001$]. Un test de comparaison de Bonferroni a permis

de montrer que la consonne bilabiale non voisée en position intervocalique a un taux d'identification correcte significativement plus élevé qu'en position d'attaque (50.6% vs. 43.6%). Ce test a également mis en évidence un effet des taux de compression temporelle à 50%, à 25% et à 10% par rapport à la condition naturelle (100% = 98%, 50% = 65.6%, 25% = 16% et 10% = 8.6% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Cependant, la différence significative entre la compression à 25% et à 10% montre une tendance à la significativité ($p = 0.054$). De plus, il existe un effet d'interaction significatif entre la Position et les taux de Compression [$F(3,985) = 27.36$; $p < .001$]. Des comparaisons par paire montrent que, dans les deux positions, il y a des effets de la compression temporelle à 50%, 25% et 10% (en C1 : 96.1% vs. 46.9% vs. 20.3% vs. 10.9% et en C2 : 100% vs. 84.4% vs. 11.7% vs. 6.3% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Cependant, la compression temporelle à 10% ne baisse pas significativement l'intelligibilité des stimuli comparée à la compression à 25% (en C1 et en C2). Des effets inverses de Position ont été mis en évidence aux conditions 50% et 25%. À 50%, le taux d'identification correcte est supérieur en position intervocalique qu'en position d'attaque ($p < .001$) alors qu'à 25%, le taux d'identification correcte est supérieur en position d'attaque qu'en position intervocalique ($p < .05$) (Figure 24).

L'occlusive alvéolaire non voisée [- voisée ; + alvéolaire]

Une ANOVA mixte à deux facteurs : la Position des consonnes (C₁, C₂) et les taux de Compression linéaire (100, 50, 25 et 10%) a présenté un effet principal significatif des taux de Compression [$F(3,984) = 725.50$; $p < .001$] mais pas de la Position des consonnes dans le pseudo-mot [$F(1,984) = 1.02$; $p = 0.3$]. Un test de comparaison de Bonferroni a permis de montrer qu'il existe un effet des taux de compression temporelle à 50%, 25% et 10% par rapport à la condition naturelle (100% = 95.7%, 50% = 79.7%, 25% = 14.8% et 0% = 0.8% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Par contre, les performances d'identification ne sont pas significativement différentes selon la position de la consonne dans le pseudo-mot (C₁ = 46.9% et C₂ = 48.6%). De plus, il existe un effet d'interaction significatif entre la Position et les taux de Compression [$F(3,984) = 4.44$; $p < .01$]. Des comparaisons par paire montrent que, dans les deux positions, il y a des effets de la compression temporelle à 50%, 25% et 10% (en C1 : 91.4% vs. 76.6% vs. 18.8% vs. 0.8% et en C2 : 100% vs. 82.8% vs. 10.9% vs. 0.8% ; $p < .05$ pour toutes les comparaisons). Des effets inverses de Position ont été mis en évidence aux conditions 100% et 25%. À 100%, le taux d'identification correcte est supérieur en position intervocalique qu'en position d'attaque ($p < .05$) alors qu'à 25%, le taux

d'identification correcte est supérieur en position d'attaque qu'en position intervocalique ($p < .05$) (Figure 24).

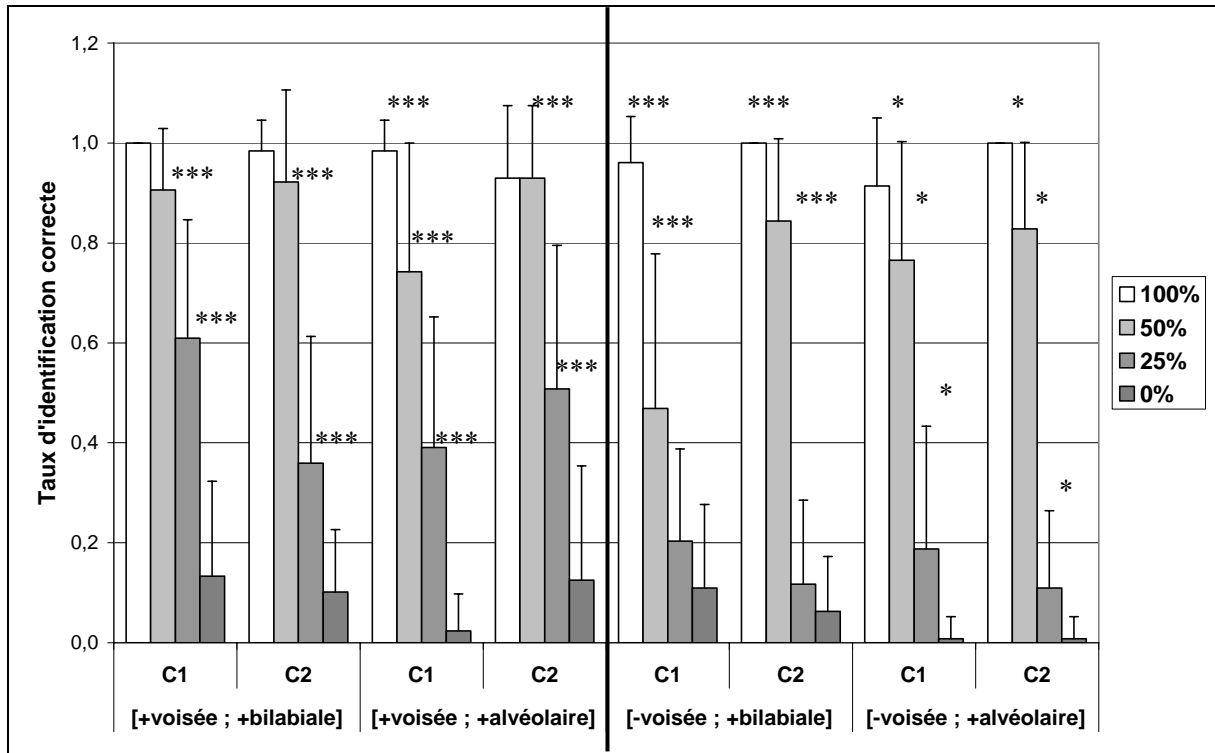


Figure 24 : Performances d'identification des occlusives selon la Position (C1 et C2) et le taux de Compression (100, 50, 25 et 0%) (***) $p < .001$ et * $p < .05$).

2.6.2.2. Analyse qualitative des erreurs

Les matrices de confusion des consonnes présentent les erreurs faites par les participants en position d'attaque et en position intervocalique (Tableau 9). Globalement, le pourcentage d'erreurs est plus important en position d'attaque qu'en position intervocalique (47.5% vs. 44.8%). Les omissions sont plus nombreuses en position d'attaque (72.7%) par rapport à la position intervocalique où les confusions dominent légèrement (56.4%). De manière générale, les occlusives non voisées font l'objet de plus nombreuses erreurs que les voisées (surtout des omissions), dès la compression à 25%, et même dès 50% en attaque.

L'occlusive bilabiale voisée [+ voisée ; + bilabiale]

en position d'attaque

Lorsque le signal est compressé à 25%, la majorité des erreurs correspondent à une omission de la consonne. Ce phénomène d'omission est encore plus important au taux de compression à 10%.

en position intervocalique

Les effets de la compression temporelle à 50, 25 et 10% impliquent des confusions sur le lieu d'articulation de la bilabiale (/b/ -> /l/ ou /r/), mais toujours une majorité d'omissions.

L'occlusive alvéolaire voisée [+ voisée ; + alvéolaire]

en position d'attaque

Pour la condition 50%, de nombreuses erreurs sur le lieu d'articulation sont faites (/d/ -> /b/). Lorsque le signal est comprimé à 25%, les erreurs se partagent entre des erreurs sur le lieu d'articulation (alvéolaire confondue avec bilabiale ou vélaire) et des omissions. Ces omissions sont majoritaires à 10%.

en position intervocalique

Les effets de la compression temporelle à 50, 25 et 10% impliquent des erreurs sur le mode d'articulation, avec des liquides (/l/ et /r/), ou des omissions.

L'occlusive bilabiale non voisée [- voisée ; + bilabiale]

en position d'attaque

Les effets de la compression temporelle à 50, 25 et 10% conduisent principalement à des omissions de la consonne.

en position intervocalique

Les omissions diminuent légèrement en faveur de plus de confusions c'est-à-dire un voisement de l'occlusive bilabiale non voisée (/p/ -> /b/) ainsi que la confusion avec des liquides (/l/ et /r/).

L'occlusive alvéolaire non voisée [- voisée ; + alvéolaire]

Cette consonne présente le même pattern d'erreurs que la bilabiale non voisée [-voisée ; + bilabiale], dans les deux positions.

Tableau 9 : Matrices de confusion de l'Expérience 4 (N = 128).

		C₁								
100%	b	d	p	t	g	k	ø			
b	128									
d		126		1	1					
p	3		123	1	1					
t		3	3	117		4	1			
50%	b	d	p	t	g	m	l	v	f	ø
b	116	4	1		3	1	1	1		1
d	23	95		1	4		2			3
p	16	1	60	3		1			1	46
t		3	9	98						18
25%	b	d	p	t	g	l	f	ø		
b	78	8	6		2		1	33		
d	25	50	3	1	11	2		36		
p	5	1	26	1			1	94		
t	3	9	2	24	1			89		
10%	b	d	p	t	g	k	m	ø		
b	17	2	12	1	1			95		
d	14	3	14	3	3			91		
p	5	1	14	4	1		1	102		
t	7	5	16	1		1		98		

		C₂								
100%	b	d	p	t	g					
b	126		2							
d	2	119		3	4					
p			128							
t				128						
50%	b	d	p	t	g	l	ø			
b	118	8	2							
d	3	119		1	2	2	1			
p	18	1	108				1			
t		18		106		4				
25%	b	d	p	t	r	l	v	ø		
b	46	16	7	1	8	21		29		
d	2	65	3	1	11	18		28		
p	29	5	16		2	15	1	60		
t	4	64	1	14	8	9		28		
10%	b	d	p	t	g	l	r	v	m	ø
b	13	6	6	1		22	8		3	69
d	5	16	2	3	1	33	11	1		56
p	20	6	7	1	2	21	9	1	2	59
t	3	9	5	1	1	29	11			69

2.6.3. Discussion

La compression linéaire du signal appliquée dans cette expérience met en évidence un effet de position important : en position intervocalique, il y a plus d'informations encore disponibles pour identifier une consonne, même si ce n'est pas la bonne.

2.6.3.1. L'effet de Position

Seule l'occlusive bilabiale voisée reste la plus résistante en position d'attaque. Au contraire, l'occlusive alvéolaire voisée montre une perte d'intelligibilité plus rapide en attaque (dès la compression à 50%). Quant à l'occlusive bilabiale non voisée, elle est toujours mieux identifiée en position intervocalique. Alors que l'occlusive alvéolaire non voisée ne montre pas d'effet de position. De manière générale, en position d'attaque, les occlusives sont majoritairement omises (> 75%) c'est-à-dire qu'elles ne sont pas perçues, sauf l'alvéolaire voisée qui montre un taux d'omission de 54.6%. /d/ est donc plus résistante à la compression temporelle, ce résultat était déjà observé dans l'Expérience 3. Au contraire, en position intervocalique, la majorité des erreurs sont des confusions (> 50%) pour les quatre occlusives. Nous suggérons que la coarticulation qui existe en position VCV facilite la perception d'une consonne même si ce n'est pas la bonne, des informations sont présentes d'où les nombreuses confusions avec les liquides /l/ et /r/. Cet effet de coarticulation ou d'assimilation ne serait pas présent en attaque pour CV d'où l'hypothèse que la voyelle précédant la consonne apporte des indices supplémentaires pour l'identification de la consonne (i.e. V_1 dans $V_1C_2V_2$). Ce résultat en intervocalique était déjà observé pour /d/ dans l'Expérience 3 mais pas pour /b/, /p/ et /t/ qui étaient majoritairement omises. Si les effets de position sont différents selon l'occlusive concernée, ce n'est pas le cas pour les effets de compression temporelle.

2.6.3.2. L'effet de la Compression temporelle

Toutes les occlusives sont sensibles à la réduction de moitié de la durée du signal. Les occlusives [+ voisée ; + alvéolaire] et [- voisée ; + bilabiale] sont les plus sensibles à 50% de compression du signal en attaque de mot. Les occlusives non voisées sont plus sensibles à la compression temporelle linéaire que les occlusives voisées. La compression linéaire conduit donc à une perte d'intelligibilité importante. Cette Expérience 4 met en évidence, si on la compare à l'Expérience 3, des effets importants du contexte acoustique, notamment en position intervocalique. Le contexte acoustique environnant est une aide précieuse pour identifier le signal de parole entier. La compression temporelle du signal est un moyen

d'observer les mécanismes de substitution des informations dégradées qui entrent en jeu lors de l'altération du signal de parole. La redondance des indices acoustiques permet ce phénomène de compensation.

2.6.3.3. Le phénomène de redondance

Dans cette dernière expérience, nous avons pu mettre en évidence le phénomène de redondance des indices acoustiques, particulièrement visible en position intervocalique. La compression d'autres indices acoustiques, en plus des deux que nous manipulions dans l'Expérience 3, montre une perte d'intelligibilité importante. En position d'attaque, les omissions sont majoritaires car la substitution des informations manquantes par d'autres traits acoustiques devient difficile du fait de la détérioration du signal entier et probablement de la présence de moins de redondance dans cette position. Nous retrouvons, comme nous l'avons vu dans l'Expérience 3, des confusions plus importantes de l'occlusive alvéolaire voisée, en attaque, qui rend compte de la résistance du burst, du fait de son intensité plus élevée, par rapport à la bilabiale voisée. Nous reviendrons sur ces processus de substitution dans la discussion générale.

Nous allons maintenant présenter une analyse acoustique des traits manipulés. Les durées des indices de voisement et des transitions, ainsi que les mesures de pente des transitions sont analysées dans la section suivante. Cette analyse a pour objectif d'évaluer dans quelle mesure la résistance (ou la vulnérabilité) de l'identification des occlusives à la compression temporelle est liée à la nature ou à la durée acoustique des indices mesurés. Nous explorons les corrélations possibles entre les mesures acoustiques des indices et les performances d'identification des occlusives observées dans les quatre expériences précédentes.

2.7. Analyse Acoustique des traits

2.7.1. Mesure du voisement

2.7.1.1. Les occlusives voisées

Nous avons mesuré la durée de la barre de voisement pour chacun de nos items et nous avons fait une moyenne pour chaque occlusive selon le lieu d'articulation et selon la Position (Tableau 10). Un test t sur des échantillons appariés n'a pas montré de différence significative de la durée du voisement selon la Position de la consonne dans le stimulus ($t_{31} = -1.12$, $p = 0.27$). En attaque, la durée moyenne du voisement est de 75.1 ms et en position intervocalique, elle est de 80.5 ms. De même, aucun effet du lieu d'articulation sur la durée de l'occlusion n'a été mis en évidence ($t_{31} = 1.27$, $p = 0.21$). La durée de voisement est égale à 80.9 ms pour la bilabiale et elle est égale à 74.7 ms pour l'alvéolaire. Par contre, nous obtenons un effet du lieu d'articulation en position intervocalique ($t_{15} = 5.04$, $p < .001$) : la bilabiale voisée a un voisement plus long que l'alvéolaire voisée (87.6 vs. 73.3 ms). Mais également un effet de Position pour la bilabiale voisée ($t_{15} = 2.26$, $p < .05$) : le voisement est plus long en position intervocalique qu'en attaque (87.6 vs. 74.1 ms).

Tableau 10 : Durées et moyennes de la barre voisement des occlusives voisées (ms), en position d'attaque (C1) et en position intervocalique (C2), et selon le lieu d'articulation.

[+ voisée]	Voisement C1 (ms)	Voisement C2 (ms)	Moyenne
[+ bilabiale]	74.1	87.6	80.9
[+ alvéolaire]	76.1	73.3	74.7
Moyenne	75.1	80.5	77.8

2.7.1.2. Les occlusives non voisées

Nous avons, de même que pour les consonnes voisées, mesuré la durée du VOT (le burst est inclus) pour chaque item (Tableau 11). Un test t sur des échantillons appariés a montré une différence significative de la durée du VOT selon la position de la consonne dans le stimulus ($t_{31} = -3.73$, $p < .001$). La durée du VOT est plus longue en position intervocalique (29.3 ms) qu'en attaque (20.3 ms). Cet effet de Position se retrouve aussi bien pour la bilabiale non voisée (17.5 vs. 23.2 ms ; $t_{15} = 2.81$, $p < .05$) que pour l'alvéolaire non voisée (23.1 vs. 35.3 ms ; $t_{15} = 2.87$, $p < .05$). De plus, nous observons un effet du lieu d'articulation sur la durée du VOT ($t_{31} = -3.03$, $p < .01$), l'alvéolaire a un VOT plus long (29.2 ms) que la

bilabiale (20.4 ms). Mais si on regarde de plus près les données, cet effet n'est significatif qu'en position intervocalique (23.2 vs. 35.3 ms ; $t_{15} = -2.38, p < .05$).

Tableau 11 : Durées et moyennes du VOT des occlusives non voisées (ms), en position d'attaque (C1) et en position intervocalique (C2), et selon le lieu d'articulation.

[- voisée]	VOT C1 (ms)	VOT C2 (ms)	Moyenne
[+ bilabiale]	17.5	23.2	20.3
[+ alvéolaire]	23.1	35.3	29.2
Moyenne	20.3	29.2	24.8

2.7.2. Mesures de la transition du second formant

Une mesure de la durée ainsi que de la pente de la transition du F2 a été effectuée. En manipulant la durée de la transition du F2, nous modifions également la valeur de la pente (Figure 25).

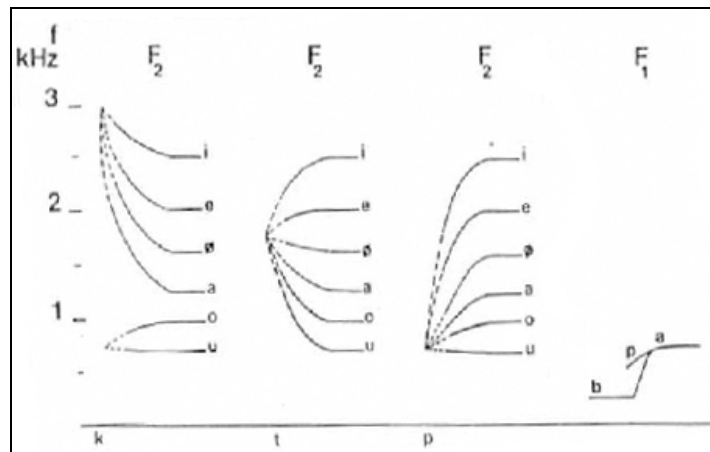


Figure 25 : Directions des transitions formantiques dans des syllabes CV en fonction des consonnes /p t k/ et des voyelles /i e ø a o u/ (Emprunté à Landercy & Renard, 1977).

2.7.2.1. La durée de la transition

Les occlusives bilabiales

Un test t sur des échantillons appariés montre un effet de Position pour les occlusives bilabiales ($t_{31} = -4.46, p < .001$). La durée de la transition est plus longue en position intervocalique (35 ms) qu'en attaque (30.7 ms). L'effet de Position est observé aussi bien pour la bilabiale voisée (32.6 vs. 35.6 ms ; $t_{15} = -2.41, p < .05$) que pour la non voisée (28.7 vs. 34.4 ms ; $t_{15} = -3.90, p < .01$). De plus, nous observons un effet du voisement sur la durée de la transition ($t_{31} = 2.33, p < .05$), les occlusives voisées ont une durée de transition plus

longue (34.1 ms) que les non voisées (31.6 ms). Cependant, cet effet de voisement est visible uniquement en attaque (32.6 vs. 28.7 ms ; $t_{15} = 2.11$, $p = .05$) (Tableau 12).

Tableau 12 : Durées et moyennes de la transition du F2 des occlusives bilabiales (ms), en position d'attaque (C1) et en position intervocalique (C2), et selon le trait de voisement.

[+ bilabiale]	Transition C1V1 (ms)	Transition C2V2 (ms)	Moyenne
[+ voisée]	32.6	35.6	34.1
[- voisée]	28.7	34.4	31.6
Moyenne	30.7	35	32.8

Les occlusives alvéolaires

Un test t sur des échantillons appariés montre un effet de Position pour les occlusives alvéolaires ($t_{31} = -4.48$, $p < .001$). La durée de la transition est plus longue en position intervocalique (39.6 ms) qu'en attaque (33.1 ms). Cet effet de Position est dû essentiellement à l'alvéolaire non voisée (31.5 vs. 40.3 ms ; $t_{15} = -5.83$, $p < .001$). Contrairement aux occlusives bilabiales, il n'y a pas d'effet du voisement sur la durée de la transition pour les alvéolaires ($t_{31} = 0.69$, $p = 0.49$), les occlusives voisées ont une durée de transition égale à 36.8 ms et elle est égale à 35.9 ms pour les non voisées. Mais si l'on regarde de plus près les données, une différence significative existe en position d'attaque ($t_{15} = 2.46$, $p < .05$). L'alvéolaire voisée a une transition plus longue (34.7 ms) que la non voisée (31.5 ms) (Tableau 13).

Tableau 13 : Durées et moyennes des transitions formantiques des occlusives alvéolaires (ms), en position d'attaque (C1) et en position intervocalique (C2), et selon le trait de voisement.

[+ alvéolaire]	Transition C1V1 (ms)	Transition C2V2 (ms)	Moyenne
[+ voisée]	34.7	38.9	36.8
[- voisée]	31.5	40.3	35.9
Moyenne	33.1	39.6	36.3

Pour les occlusives voisées, nous observons un effet du lieu d'articulation sur la durée de la transition du F2 ($t_{62} = -2.13$, $p < .05$), de même pour les non voisées ($t_{62} = -3.05$, $p < .01$) : les alvéolaires ont une durée de transition plus longue (36.3 ms) que les bilabiales (32.8 ms).

2.7.2.2. La pente de la transition du second formant

La pente de la transition du F2 est calculée en faisant le rapport de la différence des valeurs des fréquences au début et à la fin de la transition sur la durée de la transition [pente = $(\text{Fréq}_{\text{début}} - \text{Fréq}_{\text{fin}}) / \text{durée}$]. La direction de la pente varie selon la voyelle qui suit donc nous calculons une valeur de pente pour chaque syllabe. La valeur de la pente peut être négative, cela correspond à une pente ascendante ou bien positive, dans ce cas la pente est descendante (Figure 25). Nous nous intéressons à l'effet de Position sur la valeur de la pente pour chaque item (Tableau 14).

Les occlusives bilabiales

Les valeurs de pente des occlusives bilabiales sont toutes négatives donc ascendantes. Un test t pour des échantillons appariés met en évidence un effet de la Position de la consonne sur la pente de la transition pour les occlusives bilabiales ($t_{31} = 3.12$, $p < .01$). La pente est plus raide en position d'attaque (-3.6) qu'en position intervocalique où elle s'aplatit (-2). L'effet du trait de voisement n'est pas significatif pour les bilabiales ($t_{31} = 0.48$, n.s.), la pente des occlusives voisées est égale en moyenne à -2.7 alors que celle des occlusives non voisées est égale à -2.9. Mais si on regarde de plus près les données, on s'aperçoit que l'effet du trait de voisement apparaît selon la voyelle qui suit. Les non voisées ont une pente plus raide avec la voyelle [a] qu'avec la voyelle [i] ($t_{15} = 4.94$, $p < .001$; NV = -4.5 et NV = -1.4).

Les occlusives alvéolaires

Les occlusives alvéolaires présentent des pentes ascendantes et descendantes. Ainsi, nous avons utilisé les valeurs absolues des pentes dans cette comparaison afin de s'affranchir du signe négatif ou positif de la pente. Un test t pour des échantillons appariés ne rapporte aucun effet de la Position de la consonne sur la pente de la transition pour les occlusives alvéolaires ($t_{31} = -1.38$, $p = 0.18$). La pente en position d'attaque est en moyenne égale à 2.5 alors qu'en position intervocalique, elle est égale à 3.4. Contrairement aux bilabiales, l'effet du trait de voisement est significatif pour les alvéolaires ($t_{31} = 3.74$, $p < .001$), la pente des occlusives voisées est plus raide (4) que la pente des non voisées (1.9) et ce, quelle que soit la voyelle qui suit.

Tableau 14 : Valeurs des pentes de la transition du F2 pour les deux positions et pour les 8 items.

	Pente TF2	C1	C2
Bilabiales	ba	-4.04	-1.23
	bi	-3.01	-2.53
	pa	-5.88	-3.10
	pi	-1.50	-1.22
Alvéolaires	da	2.91	3.97
	di	-3.99	-4.96
	ta	1.50	3.05
	ti	-1.73	-1.47

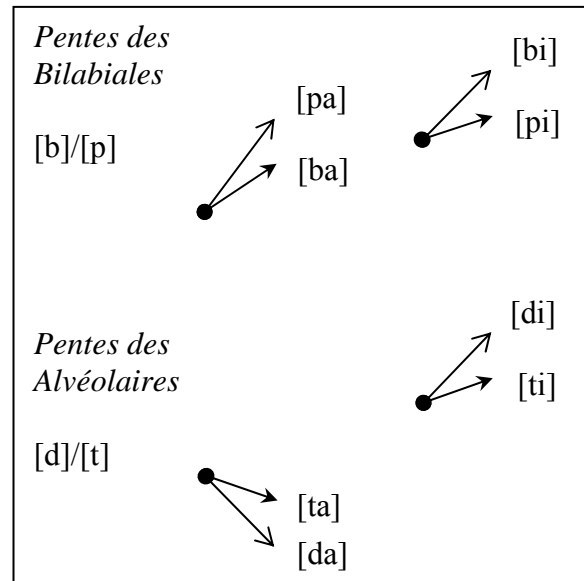


Figure 26 : Schéma de la direction des pentes de la transition du F2 pour nos items.

En position intervocalique, nous observons un effet du lieu d’articulation sur la pente de la transition du F2 ($t_{31} = -2.42, p < .05$) : les alvéolaires ont une pente de transition plus raide (3.36) que les bilabiales (2.02).

2.7.3. Corrélations

Le test de corrélation de Pearson a été utilisé pour analyser les corrélations entre les performances d’identification des pseudo-mots par les participants et les mesures des traits acoustiques. Dans les Expériences 1 et 2, nous n’avons observé aucune corrélation. La baisse des taux d’identification des consonnes n’est pas corrélée à une réduction de la durée des indices acoustiques, ni aux changements de pente des transitions.

Cependant, dans l’Expérience 3, des corrélations positives ont été mises en évidence. Pour les occlusives voisées, la durée du trait de voisement ($r = 0.64, p < .05$) et celle de la transition du F2 ($r = 0.66, p < .05$) sont corrélées aux performances d’identification des occlusives en position intervocalique. Dans les deux cas, les taux d’identification des consonnes diminuent avec la réduction de la durée du trait (Figure 27 et Figure 28). De même, nous retrouvons les mêmes corrélations pour les occlusives non voisées entre la durée du VOT et le taux d’identification ($r = 0.78, p < .01$) ainsi qu’entre la durée de la transition et le taux d’identification ($r = 0.81, p < .001$) mais, contrairement aux occlusives voisées, ces

corrélations apparaissent en position d'attaque. Ces corrélations se retrouvent également lorsque la position de l'occlusive n'est pas prise en compte.

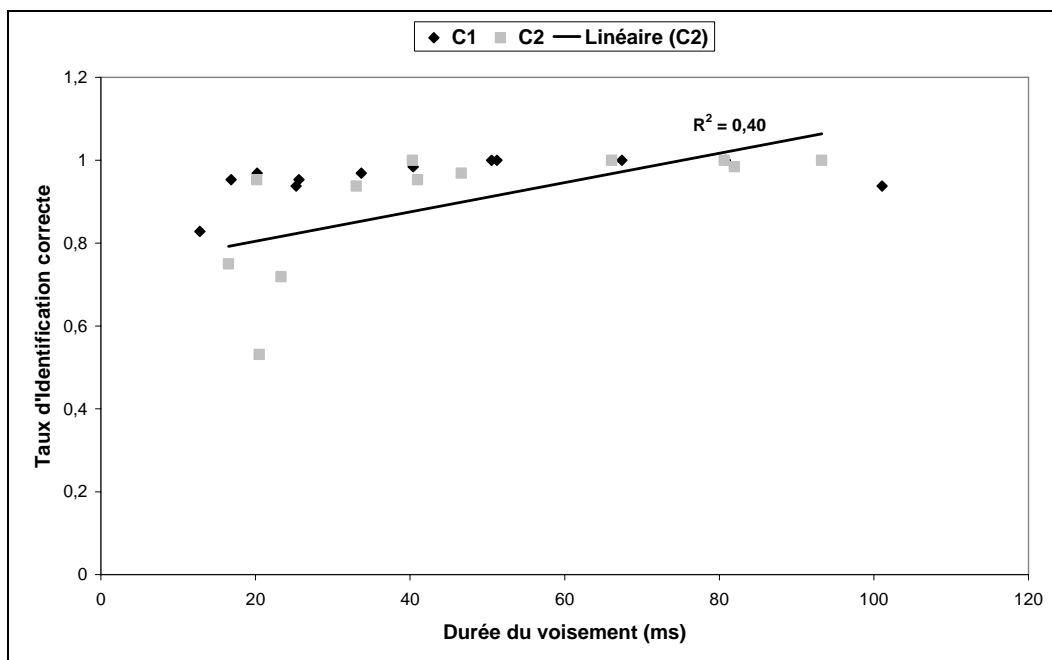


Figure 27 : Corrélation en position intervocalique entre le taux d'identification et la durée du voisement pour les occlusives voisées dans l'Expérience 3 (Courbe de tendance linéaire).

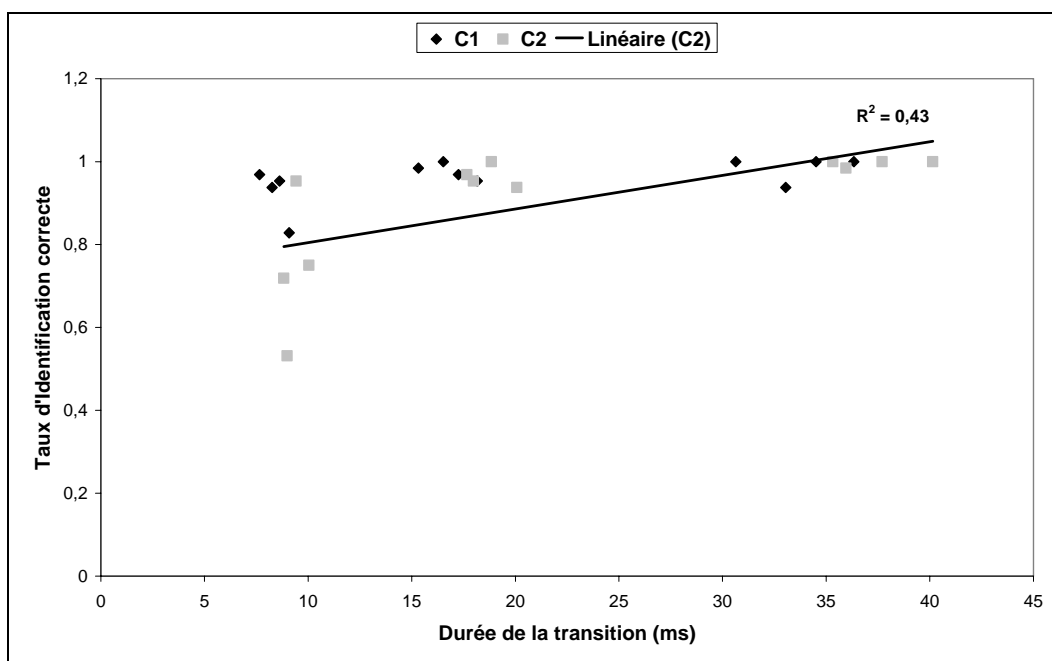


Figure 28 : Corrélation en position intervocalique entre le taux d'identification et la durée de la transition du F2 pour les occlusives voisées dans l'Expérience 3 (Courbe de tendance linéaire).

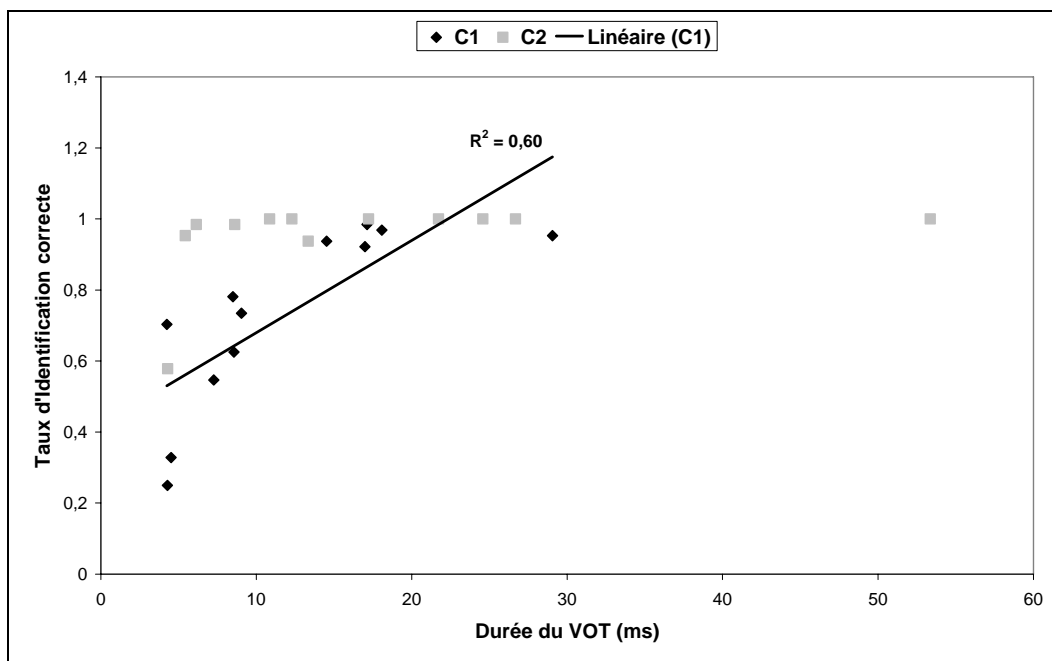


Figure 29 : Corrélation en position d'attaque entre le taux d'identification et la durée du VOT pour les occlusives non voisées dans l'Expérience 3 (Courbe de tendance linéaire).

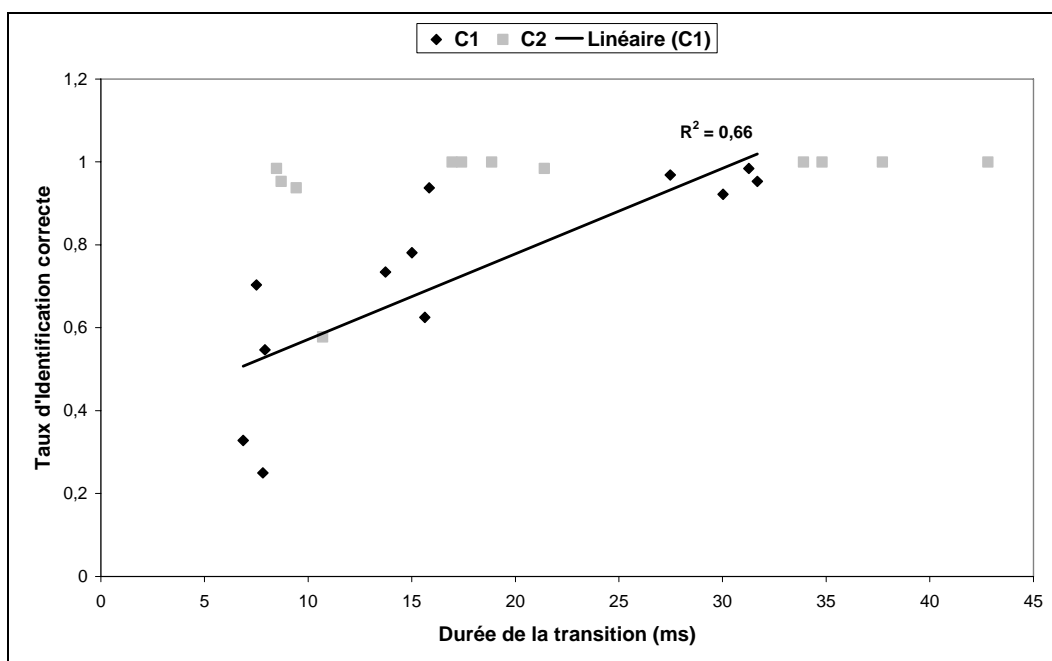


Figure 30 : Corrélation en position d'attaque entre le taux d'identification et la durée de la transition du F2 pour les occlusives non voisées dans l'Expérience 3 (Courbe de tendance linéaire).

Dans l'Expérience 4, toutes les corrélations sont significatives, ce qui s'explique par le fait que la compression temporelle est appliquée à tout le signal, par conséquent, la réduction de la durée des indices est perdue dans la réduction totale du signal ce qui implique un taux

d'identification qui diminue en même temps. L'effet de la compression temporelle sur le contexte ne permet pas de mettre en évidence des corrélations spécifiques entre la durée des traits et les taux d'identification.

2.7.4. Discussion

Nos mesures de durée du voisement et des transitions, ainsi que le calcul des pentes sont en accord avec les données de la littérature (Calliope, 1989 ; Delattre, 1966a ; Delattre, Liberman, & Cooper, 1955 ; Serniclaes, 1987).

2.7.4.1. La durée du voisement

Serniclaes (1987) rapporte, en français, des valeurs de VOT négatif pour les occlusives voisées égales en moyenne à -100 ms et des valeurs de VOT positives pour les non voisées autour de +30 ms. Nous retrouvons des valeurs proches de celles de Serniclaes : -77.8 ms pour les occlusives voisées et +24.8 ms pour les non voisées. Nous avons observé également un effet de position sur la durée du voisement pour les occlusives non voisées, le voisement est plus long en position intervocalique. Cet effet n'est pas significatif pour les occlusives voisées. De même, un effet du lieu d'articulation a été mis en évidence sur la durée du voisement pour les occlusives non voisées mais pas pour les occlusives voisées. La durée du VOT est plus longue pour l'occlusive alvéolaire non voisée que pour l'occlusive bilabiale non voisée.

2.7.4.2. La durée des transitions

La durée moyenne des transitions rapportée dans la littérature est d'environ 40-50 ms (Delattre, 1966a ; Delattre, Liberman, & Cooper, 1955). Nos mesures sont en accord avec cette étude, nous obtenons une moyenne de 34 ms. Nous observons un effet de la position sur la durée des transitions : les transitions sont plus longues en position intervocalique. Par contre, nous observons un effet du voisement sur la durée des transitions pour les occlusives bilabiales : les transitions sont plus longues pour l'occlusive bilabiale voisée que pour la non voisée.

2.7.4.3. La pente de la transition du second formant

Il est connu que la pente des transitions des formants dépend des lieux d'articulation de la consonne et de la voyelle. Pour les occlusives bilabiales, nous avons mis en évidence un effet de la position de la consonne sur la valeur de la pente : la pente est plus raide en position d'attaque qu'en position intervocalique. De plus, un effet du voisement selon la voyelle qui

suit a été observé sur la valeur de la pente : l’occlusive bilabiale non voisée a une pente plus raide que la voisée devant la voyelle [a] alors que l’inverse est apparu devant la voyelle [i]. En ce qui concerne, les occlusives alvéolaires, nous ne retrouvons pas l’effet de position sur la valeur de la pente mais nous mettons également en évidence un effet du voisement sur la valeur de la pente quelle que soit la voyelle qui suit : l’occlusive alvéolaire voisée présente une pente plus raide que la non voisée.

Tous ces résultats, quant aux mesures des traits, permettent d’expliquer la vulnérabilité de l’occlusive alvéolaire non voisée et la résistance de l’occlusive bilabiale voisée. La première a, en effet, un VOT plus long que la bilabiale non voisée ; elle n’a pas de durées de transitions significativement différentes de l’alvéolaire voisée mais elle a une pente plus aplatis que celle-ci. En considérant que le voisement est le trait le plus sensible à la compression temporelle, il est raisonnable de dire que l’alvéolaire non voisée est, par conséquent, plus difficile à discriminer. Par contre, pour l’occlusive bilabiale voisée, le seul fait que la durée de la transition soit plus longue que la bilabiale non voisée suffirait à la discriminer dans des conditions de compression, si l’on considère également que la compression temporelle de la durée de la transition ne montre guère d’effet sur la discrimination. Nous reviendrons sur le rôle relatif de chacun des traits acoustiques dans l’identification de la parole, dans la discussion générale.

2.7.4.4. Les corrélations

L’absence de corrélations dans les Expériences 1 et 2 signifie que les performances d’identification des pseudo-mots obtenues ne sont pas représentatives de la réduction temporelle des traits acoustiques. Des mécanismes de substitution sont probablement intervenus pour remplacer les informations perdues et ont donc conduit à de meilleures performances.

Par contre, lorsque ces mécanismes deviennent moins efficaces du fait d’une augmentation de la quantité d’informations dégradées (Expériences 3 et 4), nous obtenons des corrélations significatives entre les performances d’identification des occlusives et les mesures acoustiques. La durée du voisement ainsi que celle des transitions a permis de mettre en évidence des corrélations, ce qui renforce l’idée d’indices temporels pertinents.

Dans l’Expérience 3, pour les occlusives voisées, la réduction de durée du voisement et des transitions conduit à une diminution des performances d’identification en position intervocalique. De même pour les non voisées, mais en position intervocalique, la réduction

de la durée du VOT et des transitions corrèle avec la baisse des performances d'identification des occlusives. L'ensemble de ces résultats indiquent que la durée du voisement et la durée des transitions jouent chacune un rôle dans l'identification des occlusives dépendant de la position dans le pseudo-mot. La saillance acoustique des indices pourrait expliquer cet effet de position, le VOT serait un indice plus saillant en position intervocalique, de plus, la redondance du signal peut aider à l'identification. Au contraire, la barre de voisement serait plus saillante acoustiquement en position d'attaque, par conséquent, la réduction de la durée de voisement en attaque n'affecte pas les performances des participants. Même chose, pour les transitions, les processus de traitement des deux indices semblent agir dans le même sens.

Dans l'Expérience 4, la compression temporelle du signal de façon homogène entraîne une réduction de durée de nombreux indices acoustiques menant à une baisse importante des performances d'identification des occlusives, d'où les multiples corrélations obtenues. Les performances d'identification ne peuvent donc pas être corrélées à la compression d'un seul trait mais plutôt à la combinaison de plusieurs traits.

2.8. Discussion Générale

Dans ce Chapitre, quatre expériences de compression temporelle ont été menées. La compression temporelle portait sur le trait de voisement (Expérience 1), sur le trait de lieu d'articulation (Expérience 2), sur les deux traits simultanément (Expérience 3) ou bien sur le signal entier (Expérience 4). De manière générale, l'intelligibilité de la parole est affectée par la compression temporelle des traits acoustiques. Plus précisément, les taux d'identification des pseudo-mots sont diminués par la réduction temporelle des traits acoustiques, excepté dans l'Expérience 2 lorsque l'indice de lieu d'articulation qu'est la transition du F2, uniquement, est manipulé. Sinon, dans les trois autres expériences, la perte d'intelligibilité est liée au taux de compression : plus la compression est importante, plus l'intelligibilité diminue. Cependant, cette perte d'intelligibilité est différente selon le taux de compression et selon la nature du trait acoustique compressé.

2.8.1. L'effet de compression temporelle

Le signal reste compréhensible même lorsque la durée des traits est réduite de moitié sauf quand une trop grande quantité d'information est dégradée comme dans les Expériences 3 et 4. Nous pouvons conclure qu'à 50% de compression, le signal garde une bonne intelligibilité. Alors que les compressions à 25% et 0% ou 10% conduisent à une perte significative d'intelligibilité dans les quatre Expériences. La réduction de durée des indices affecte leur intégration et leur perception. Le traitement temporel est perturbé par cette compression. Nous pouvons modéliser ces quatre Expériences sur un continuum variant sur la quantité d'informations modifiées (Tableau 15). Le taux d'identification des stimuli diminue avec la quantité d'informations perdues. Tout d'abord, l'Expérience 2 présente une baisse significative des performances uniquement lorsque le trait de lieu d'articulation est supprimé. Ensuite, l'Expérience 1 met en évidence un effet de la compression à 25% du trait de voisement sur l'identification des stimuli. Puis, dans l'Expérience 3, les deux traits compressés impliquent une perte d'intelligibilité significative des stimuli dès la compression à 50%. Enfin, l'Expérience 4, où la compression porte sur le signal entier, mène à une diminution déjà significative des performances à 50% de compression et encore plus à 25% et à 10%.

Tableau 15 : Modélisation du continuum des 4 Expériences, le symbole ↓ signifie une baisse significative des performances. Pourcentage d'identification correcte des consonnes pour chaque taux de Compression des traits, pour les 4 Expériences.

		100%	50%	25%	0% (10%)
Expérience 2	Transition	98.6	98.9	98.1	91.1 ↓
Expérience 1	Voisement	97.9	96.9	92.6 ↓	67.8 ↓
Expérience 3	Voisement+Transition	98.4	92.7 ↓	74.5 ↓	29.2 ↓↓
Expérience 4	Compression linéaire	97.2	80.1 ↓↓	31.1 ↓↓	7.1 ↓↓↓

Cette représentation sur un continuum met en évidence l'utilisation d'autres traits acoustiques afin de remplacer les informations manquantes pour identifier les pseudo-mots. La redondance des traits acoustiques permet l'identification des occlusives malgré la dégradation. Le contexte joue donc un rôle primordial, le système va chercher dans le contexte des informations de remplacement afin de pouvoir effectuer une bonne distinction entre les phonèmes.

2.8.2. La redondance des indices acoustiques

Grâce à nos expériences, nous avons pu constater que les participants utilisaient d'autres indices acoustiques disponibles dans le signal acoustique afin de pallier à la perte d'informations due à la compression temporelle. La partie du signal qui reste intacte contient de nombreux autres indices acoustiques, en dehors du voisement (ou VOT) et des transitions formantiques que nous avons manipulé. Par exemple, le trait de voisement peut également être distingué grâce à l'analyse acoustique du premier formant. De même, un autre indice acoustique permettant la discrimination du lieu d'articulation est l'explosion de la consonne mais également, la transition V_1C_2 . C'est donc parmi ces indices que les mécanismes de compensation vont aller chercher des informations pour restaurer le phonème compressé.

2.8.3. Le rôle relatif de chaque indice acoustique

En ce qui concerne la nature de l'indice acoustique et la part relative de chacun des indices dans l'identification de la parole, nos résultats montrent une différence des effets de la compression temporelle selon la nature de l'indice acoustique. Dans les Expériences 1 et 2, où

les deux indices sont manipulés indépendamment l'un de l'autre, les performances sont différentes et mettent en évidence un effet de la compression sur l'indice de voisement mais pas sur l'indice de lieu d'articulation. L'indice de voisement est donc sensible à la réduction temporelle de sa durée, aussi bien pour les occlusives voisées que non voisées, alors que l'indice de lieu d'articulation ne l'est pas. Le voisement est un indice temporel plus pertinent que le lieu d'articulation dans l'identification de la parole. Nos résultats sont en accord avec les travaux de Niyogi et Ramesh (2003) qui montrent que le VOT est bon indice temporel pour discriminer deux occlusives selon leur voisement. Lorsque la durée du VOT est réduite de 1/3, Andruski, Blumstein et Burton (1994) n'observent pas de différence significative sur les temps de catégorisation de phonèmes. Par contre, si la réduction du VOT est égale à 2/3, les auteurs montrent une différence significative dans les temps de catégorisation. Les processus de catégorisation sont plus lents car le nombre d'exemplaires disponibles a été réduit.

De plus, l'Expérience 3 a mis en évidence deux types de relation entre le trait de voisement et le trait de lieu d'articulation. Pour les occlusives voisées, les effets de compression des deux traits s'ajoutent, ce qui démontre un traitement en parallèle, indépendant des deux traits. Au contraire, pour les occlusives non voisées, une intégration complexe des deux traits est observée ce qui rend compte d'une interaction entre les deux traits acoustiques. Les résultats soulignent particulièrement une sensibilité plus marquée des occlusives alvéolaires non voisées à la compression temporelle [- voisée ; + alvéolaire]. L'identification du lieu d'articulation est meilleure pour les occlusives non voisées que pour les occlusives voisées. Nos résultats suggèrent que le trait de voisement prédomine sur l'indice de lieu d'articulation alors que l'indice de lieu d'articulation prédomine sur le VOT.

Shinn, Blumstein et Jongman (1985) montrent des résultats intéressants sur la réduction voire l'annulation de l'effet du débit si les dimensions temporelle et spectrale sont manipulées en même temps. Les participants sont moins affectés par le changement de débit pour des phrases modifiées au niveau spectro-temporelle que dans la condition où la dimension temporelle ou spectrale uniquement est modifiée. L'effet de débit est donc moins important dans la condition spectro-temporelle que dans la condition temporelle. Les auteurs postulent que l'identification est beaucoup plus précise dans la condition spectro-temporelle car la pente de la transition est plus raide. La présence des deux indices qui covarient naturellement mène donc à une meilleure précision d'identification et semble être moins influencée par le débit. Ces résultats suggèrent que les participants n'utilisent pas

l'information temporelle et qu'il n'y a pas de mécanismes d'ajustements car assez d'informations sont données par les fréquences des formants. Nous pouvons donc rapprocher nos résultats de cette étude, en suggérant que la compression temporelle des transitions modifie la pente mais il reste suffisamment d'informations pour identifier la consonne. Les meilleures performances obtenues dans l'Expérience 2 s'expliquent donc par le fait que les participants ne traitent pas l'information strictement temporelle de la transition, donc la compression n'a pas d'effet. Par contre, les participants vont être sensibles aux variations de pente de la transition du second formant qui est de nature spectro-temporelle. Dans notre étude, cette association des deux traits diminue la précision de discrimination. Lisker et Abramson (1964) montrent que le lieu d'articulation tout comme le débit exerce une influence sur la valeur du VOT. Plus le mouvement articulatoire s'accélère, plus la valeur de VOT est petite (Hardcastle, 1973). La valeur de VOT devient plus longue lorsque le lieu d'articulation se déplace de l'avant à l'arrière du tractus vocal (de bilabial à vélaire) (Fisher-Jørgensen, 1954 ; Peterson & Lehiste, 1960). Nous retrouvons cette relation dans nos résultats pour les occlusives non voisées : la durée du VOT est plus longue pour les occlusives alvéolaires que pour les bilabiales. Une explication proposée est que les occlusives bilabiales sont prononcées plus rapidement que les autres (Fant, 1960 p.199). De même, plus la zone de contact articulatoire est étendue, plus la valeur de VOT est longue (Stevens, Keyser, & Kawasaki, 1986).

Par ailleurs, Miller et Nicely (1955) apportent une analyse de confusions de consonnes lors d'une tâche d'identification en anglais de syllabes du type CV dans le bruit. L'expérience porte sur la qualité de transmission de l'information lorsque deux mots se différencient uniquement sur la consonne initiale par un trait distinctif. Les résultats de cette étude montrent que le voisement et le mode d'articulation sont des traits phonétiques plus résistants au bruit que le lieu d'articulation qui est plus souvent confondu. Les indices de lieu d'articulation sont les plus vulnérables. Ce résultat tient au fait que le bruit est un masque spectro-temporel qui va affecter, plus particulièrement, la dimension spectrale du lieu d'articulation. De plus, d'après une mesure de la quantité d'information transmise, le contraste consonantique est moins robuste en position de coda qu'en position d'attaque dans la syllabe. Dans notre étude, nous n'avons pas étudié cette position de coda dans la syllabe puisque nous utilisons des pseudo-mots bisyllabiques de forme CVCV. Des études dans le bruit (Miller & Nicely, 1955 ; Pols, 1983) montrent que les segments sont la plupart du temps confondus avec des phonèmes de la même classe (p.ex. les occlusives sont confondues avec des occlusives).

Nous émettons l’hypothèse selon laquelle la fréquence d’usage des consonnes pourrait expliquer certaines erreurs, nous aurions tendance à rappeler la consonne la plus fréquente de la langue. Ce phénomène serait encore plus vrai pour les pseudo-mots puisque l’influence lexicale est inexistante. Le Tableau 16 présente les fréquences des consonnes en français selon leur position dans la syllabe. De manière générale, les occlusives alvéolaires sont plus fréquentes que les bilabiales. Le tableau met en évidence une fréquence d’occurrence importante de l’occlusive alvéolaire non voisée aussi bien en attaque de syllabe qu’après la voyelle (Dos Santos, 2007). Cependant, nous n’observons pas ce phénomène dans nos résultats. Au contraire, l’occlusive alvéolaire non voisée est la plus difficilement rappelée. L’intégrité acoustique de cette consonne est nécessaire pour la discriminer. La présence importante de cette consonne en français reflète un traitement acoustique fin de la combinaison des traits acoustiques.

Tableau 16 : Fréquences des consonnes du français selon leur position dans la syllabe. Tableau tiré de la thèse de Christophe Dos Santos (2007), à partir de la base de données Lexique 3.

Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tête d’attaque	[s]	[t]	[l]	[d]	[v]	[p]	[m]	[n]	[k]
	12,2%	11,5%	10,9%	9,6%	8,4%	8,1%	7,5%	6,9%	6,4%
Après la voyelle	[ʁ]	[l]	[t]	[s]	[n]	[k]	[m]	[d]	[z]
	30,4%	16,8%	12,3%	10,0%	6,9%	4,8%	4,6%	2,7%	2,4%
Toutes positions confondues	[ʁ]	[l]	[t]	[s]	[d]	[m]	[n]	[v]	[p]
	13,1%	12,8%	11,4%	11,3%	7,6%	6,5%	6,5%	6,4%	6,0%
Rang	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Tête d’attaque	[ʒ]	[ʁ]	[f]	[b]	[ʃ]	[z]	[g]	[ŋ]	[p]
	6,3%	3,7%	3,2%	2,1%	1,3%	1,2%	0,8%	0,0%	0,0%
Après la voyelle	[b]	[v]	[ʒ]	[p]	[ʃ]	[f]	[g]	[p]	[ŋ]
	2,0%	1,7%	1,7%	1,1%	0,9%	0,7%	0,5%	0,3%	0,1%
Toutes positions confondues	[k]	[ʒ]	[f]	[b]	z	[ʃ]	[g]	[p]	[ŋ]
	5,8%	4,9%	2,4%	1,9%	1,4%	1,2%	0,7%	0,1%	0,0%

Pour une explication de nos résultats, nous nous basons sur les règles dynamiques qui gouvernent l’enchaînement des phonèmes dans la parole continue. Notamment, les règles de coarticulation des occlusives en position intervocalique VCV.

2.8.4. L'effet de coarticulation

De nombreuses études ont mis en évidence des phénomènes de coarticulation et d'assimilation (Liberman, Cooper, Shankweiler, & Studdert-Kennedy, 1967 ; Snoeren, Hallé, & Segui, 2006) c'est-à-dire qu'il existe un transfert des traits phonétiques, comme le voisement et le lieu d'articulation, de la consonne intervocalique vers les phonèmes adjacents. La voyelle précédente influence également la structure acoustique de la consonne intervocalique (Öhman, 1966). Le sujet peut anticiper grâce à ces informations. Öhman (1966) démontre que la voyelle initiale, dans des mots de forme VCV, influence la transition initiale de la voyelle finale à travers la consonne intervocalique. Et inversement, la voyelle finale influence la transition finale de la voyelle initiale à travers la consonne intervocalique. Un exemple connu est l'assimilation régressive de voyelle à voyelle en anglais, l'identification de la seconde voyelle est en partie prédictible grâce aux indices acoustiques de la première voyelle (Martin & Bunnell, 1981). La variabilité des transitions dans la séquence V_1C est contrôlée par la voyelle postconsonantique CV_2 . Les mouvements de la voyelle finale commencent en même temps ou peu de temps après le début des gestes articulatoires de la consonne. Les gestes de la consonne sont superposés à un contexte vocalique qui est présent pendant toute la durée de la consonne. Des phénomènes d'assimilation progressive et régressive rendent compte de ces ajustements au niveau articulatoire. La production de la consonne implique des ajustements articulatoires partiels concomitants pour anticiper la configuration de la voyelle suivante. Les processus pour la consonne et la voyelle doivent donc être activés en même temps. Cependant, certains aspects de la voyelle finale peuvent être inhibés pendant la durée de la consonne. Et la configuration de la consonne intervocalique peut être anticipée pendant la voyelle initiale.

Dorman, Studdert-Kennedy et Raphael (1977) montrent un effet du contexte vocalique sur les indices acoustiques pour identifier le lieu d'articulation. Strange, Jenkins et Johnson (1983) montrent que la voyelle centrale d'une syllabe peut être identifiée correctement à partir des seules transitions initiales et finales, la partie centrale, stable, ayant été excisée. Lindblom et Studdert-Kennedy (1967) étudient le phénomène de réduction vocalique. En parole continue, le signal prononcé ne correspond pas à la réalisation de la même voyelle qu'en prononciation soutenue (isolée). Des effets de coarticulation vont modifier le signal acoustique des voyelles à cause de l'influence du contexte vocalique et consonantique.

Nos résultats sont en faveur d'un contraste consonantique plus robuste en position intervocalique qu'en position d'attaque du pseudo-mot.

2.8.5. L'effet de position de la consonne

Nos résultats montrent globalement une meilleure identification de la consonne intervocalique par rapport à la consonne en attaque. Cette position est favorable aux phénomènes de coarticulation qui correspondent à la répartition d'informations acoustiques sur un ensemble de syllabes ou sur plusieurs syllabes consécutives. De plus, dans cette position, l'indice de transition est double : V_1C_2 et C_2V_2 . Des informations acoustiques en dehors des indices manipulés vont donc être disponibles pour l'identification de la consonne. Des études ont porté sur la perception de la consonne intervocalique et sur les indices acoustiques impliqués dans cette perception. Les résultats des études précédentes postulent que la transition CV est prédominante sur l'identification de la consonne intervocalique, dans un mot de forme VCV ou VCCV, mais les processus d'identification se compliquent lorsqu'il y a de nombreux indices. Le système ferait une intégration des indices des transitions VC et CV. Streeter et Nigro (1979) montrent que lorsque la transition VC est en conflit avec la transition CV, cela ralentit la décision lexicale pour les mots de forme VCCV. Lorsque les transitions sont conflictuelles, les processus d'intégration sont perturbés et nous observons alors une prédominance de la transition CV due à un effet de masquage sur la transition VC. Cependant, Repp (1980) montre une contribution notable des informations de la transition VC pour l'identification de la consonne intervocalique. Les participants utilisent l'ensemble des indices intervocaliques pour discriminer les phonèmes. Repp (1978) avait montré un léger effet de la transition VC sur CV quand la transition CV était ambiguë. Les consonnes intervocaliques, indicées par VC et CV, sont difficiles à discriminer s'il y a uniquement la présence de la transition CV. Si la transition VC est enlevée des mots de forme VCV, les performances diminuent. Dorman et Raphael (1980) montrent également une plus grande importance de la transition VC qui comporterait des informations plus pertinentes.

Dans l'Expérience 1, nous avons remarqué que les occlusives voisées étaient moins bien identifiées en position intervocalique. Nous pouvons tenter d'interpréter ce résultat au travers de l'étude de Tartter et al. (1983) qui porte sur la perception de la consonne intervocalique et notamment la contribution de la durée de l'occlusion et des transitions formantiques. L'occlusion voisée correspond aux oscillations périodiques de basse intensité qui précèdent l'explosion de la consonne (Snoeren, Hallé, & Segui, 2006). L'explosion de la consonne n'est, par conséquent, pas comprise dans la durée du segment compressé. Tartter et al. (1983) montrent que l'occlusion apporte des informations sur l'identité de la consonne et peut interagir avec les transitions pour créer un indice complexe. Nous supposons que le

contexte vocalique dans lequel se trouve la consonne atténuée la saillance acoustique de la barre de voisement de l'occlusive ce qui mène à des erreurs.

2.8.6. La durée de l'occlusion

La durée de l'occlusion est une période critique pour l'identification de la consonne. Pour les occlusives non voisées, la durée de l'occlusion correspond à la phase de silence alors que pour les voisées, elle équivaut à la barre de voisement. Cazals (1994) montre que des participants malentendants ont besoin d'une durée d'occlusion plus longue afin d'éviter les erreurs de voisement dans une tâche d'identification de stimuli VCV. Cependant, il observe également une grande variabilité entre les individus, il conclut donc qu'une anomalie de perception temporelle liée à la perte auditive n'induit pas systématiquement des confusions de voisement.

Port (1981) diminue la durée d'occlusion ce qui a pour conséquence de changer le lieu et le mode d'articulation (« rabpid » / « ratted »). Nous avons observé les mêmes types d'erreurs dans notre Expérience 1. Massaro (1975) dit que la durée d'occlusion peut affecter le traitement perceptif des autres indices acoustiques. Les informations courtes de la seconde syllabe peuvent masquer les informations de la première syllabe. Si la transition VC est suivie d'une durée de moins de 50 ms alors il apparaît un effet de masque de la seconde syllabe mais le masquage n'est pas complet. Lehiste (1970) montre que les occlusives bilabiales ont une durée d'occlusion plus longue que les alvéolaires et les vélaires. Dans l'étude de Tartter et al. (1983), le long du continuum [d-g], si la durée de l'occlusion est égale à 20 ms, la transition CV prédomine alors que si la durée de l'occlusion augmente, la transition VC prédomine. Au contraire, le long du continuum [b-d], il n'y a pas de prédominance. La durée de l'occlusion interagit de manière complexe avec les indices des transitions formantiques. Lorsque la durée de l'occlusion est courte, la transition CV joue un rôle plus important que la transition VC dans l'identification des VCCV. Donc la transition VC a peu d'impact sur l'identification de la consonne intervocalique quand les deux transitions VC et CV sont présentes. La transition CV joue un rôle dans l'identification de la consonne intervocalique quand la durée de l'occlusion est courte (25 ms ou moins). Des stratégies et des processus différents interviennent selon la durée de l'occlusion. Il n'y a pas de différence réelle entre les deux types de transitions : VC et CV. La différence repose sur la nature de la transition qui interagit avec des indices additionnels dans VCV. Il semble que la transition CV soit plus pertinente pour les bilabiales alors que c'est la transition VC pour les alvéolaires. La transition VC a peu d'impact sur l'identification des occlusives intervocaliques mais on utilise tout de même les

informations de VC (Repp, 1980 ; Streeter & Nigro, 1979). La perception de la consonne intervocalique implique une interaction complexe de plusieurs indices : VCV serait plus similaire à la transition CV qu'à la transition VC.

D'autres indices acoustiques, comme l'explosion de la consonne, peuvent être impliqués dans l'identification du signal de parole.

2.8.7. L'amplitude du burst

Pour nos consonnes occlusives non voisées, nous avons segmenté la durée du VOT entre le début de l'explosion de la consonne et le début des oscillations périodiques de la voyelle. L'indice acoustique comprend plusieurs traits comme l'explosion de la consonne dont le spectre informe sur le lieu d'articulation de la consonne. Le spectre de l'explosion permet d'observer des pics de fréquence et ou des bandes spectrales d'énergie. Le bruit du burst est produit au lieu d'articulation de la consonne et est très court. Le burst des occlusives arrières (alvéolaires, vélaires) est plus saillant que celui des occlusives antérieures (bilabiales) du fait que le tractus vocal en avant de la constriction est plus long donc le burst contient plus d'information sur l'articulation (Ohala, 1983). Le burst est décrit comme une phase transitoire et un spectre plat. L'intensité du burst des bilabiales est plus faible que celle des alvéolaires. Le burst des bilabiales n'a pas de pics de formant et l'énergie est diffuse à toutes les fréquences alors que celui des alvéolaires a des pics énergétiques aux hautes fréquences. La fréquence du pic spectral pour les bilabiales est inférieure à 1 kHz alors que pour les alvéolaires, le pic est aux hautes fréquences supérieur à 3 kHz. L'indice d'énergie est utilisé dans la distinction entre les bilabiales et les alvéolaires : les bilabiales ont un spectre d'énergie inférieur à celui des alvéolaires. Le burst des alvéolaires est donc plus saillant acoustiquement ce qui pourrait expliquer la sensibilité particulière de l'occlusive alvéolaire non voisée à la compression temporelle et rendre compte des erreurs de confusion, comme nous l'avons remarqué dans l'Expérience 3.

Deux propriétés acoustiques différentes sont impliquées dans la distinction des alvéolaires et des bilabiales. La première propriété acoustique est le changement d'amplitude spectral aux hautes fréquences et la seconde propriété correspond aux fréquences des pics du spectre associées à F2 et F3. Ohde et Stevens (1983) montrent que pour les occlusives non voisées, l'amplitude du burst est plus faible, ce qui permet d'identifier [p-t]. Pour les occlusives voisées (Ohde, 1979), l'amplitude des pics correspondant aux formants est plus importante. L'amplitude du burst correspondant aux régions des hautes fréquences de la voyelle suivante (F4-F5) est supérieure pour l'occlusive alvéolaire non voisée (Zue, 1976). Le

pic de F2 est plus bas pour les non voisées que pour les voisées donc au début du spectre, le pic de F2 sera plus saillant pour les voisées et donc l'indice fourni par F2 sera plus fort. Le spectre au début du voisement pour les bilabiales et les alvéolaires ne diffère pas seulement avec les fréquences spectrales au pic mais également avec les formants au début du voisement ainsi qu'avec la forme du spectre correspondant à l'amplitude relative des pics. En anglais, l'alvéolaire voisée [d] présente un pic d'intensité au moment de l'explosion correspondant aux régions des hautes fréquences (F4, F5). Pour les bilabiales, le burst est faible et ne présente donc pas de pic d'énergie. La configuration articuloire reste invariante malgré la voyelle suivante mais la temporalité des transitions formantiques dépend de la consonne et de la voyelle (début/fin). Ce constat peut expliquer les résultats obtenus dans l'Expérience 3, où nous avons vu que les occlusives voisées quel que soit le lieu d'articulation, étaient moins sensibles à la compression temporelle des deux traits que les occlusives non voisées (aussi bien bilabiale qu'alvéolaire). Le pic de F2 des occlusives voisées leur confère un caractère de fiabilité important qui résiste même lorsque les deux traits (voisement et lieu d'articulation) sont dégradés. L'amplitude et le spectre du burst peuvent influencer l'identification du lieu d'articulation entre bilabiale et alvéolaire pour les consonnes voisées et non voisées.

2.8.8. La durée du burst

Krull (1990) montre une meilleure identification des bilabiales qui ont un burst plus court : 10 à 20 ms suffisent pour distinguer une bilabiale d'une alvéolaire. De plus, l'auteur démontre que si l'on coupe une partie ou l'intégralité de la durée de la voyelle suivante, il y a plus de confusions.

Stevens et Blumstein (1978) mettent en évidence un invariant pour les occlusives qui peut être extrait dans les 30 premières millisecondes d'explosion énergétique. Cet invariant serait la forme brute du spectre de cette fenêtre temporelle. La forme du spectre serait diffuse et ascendante pour /d/ alors qu'elle serait diffuse et descendante pour /b/ mais cet invariant est observé uniquement en début de syllabe (pour une revue voir Miller & Eimas, 1995). L'énergie acoustique du spectre du burst qui a lieu au moment du relâchement de la consonne fournit un indice pour le lieu d'articulation. Les fréquences de début de F2 et F3 également. Ainsi que la direction des changements rapides du spectre dans les 10 premières millisecondes suivant le relâchement de la consonne. Blumstein et Stevens (1979) observent que pour chaque lieu d'articulation, il y a des propriétés acoustiques invariantes indépendantes du contexte vocalique. L'identification est, par conséquent, plus directe car il existe une relation simple entre le trait acoustique et le trait phonétique. Par exemple, pour

distinguer les occlusives bilabiales des alvéolaires, nous pouvons utiliser trois indices différents. Le premier indice est la forme brute du spectre au moment du relâchement. Le second correspond aux changements de la forme du spectre dans les 10 premières millisecondes qui suivent le relâchement de l'occlusive. Le troisième indice utilisable rend compte des changements d'amplitude de l'enveloppe temporelle aux hautes fréquences dans la bande de F4 et F5. Lahiri et Blumstein (1981) déclarent que les alvéolaires peuvent être distinguées des bilabiales en examinant comment l'amplitude du spectre aux hautes fréquences au moment du relâchement de la consonne change avec le temps dans les 10 premières millisecondes qui suivent le relâchement.

Smits, ten Bosch et Collier (1996b) déclarent que le burst seul permet de reconnaître le lieu d'articulation pour les non voisées alors qu'il est moins pertinent pour les voisées. Le burst des non voisées est plus pertinent dans l'identification du lieu d'articulation que le burst des voisées. Nos résultats sont en accord avec cette étude. Des erreurs plus fréquentes sur le lieu d'articulation ont été observées pour les occlusives voisées par rapport aux non voisées. De plus, les transitions du /p/ sont fortes et robustes pour identifier le lieu d'articulation. Le système perceptif dépend plus fortement de l'information du burst pour les non voisées que pour les voisées. Smits, ten Bosch et Collier (1996a) démontrent également que la longueur du burst augmente avec la postériorité du lieu d'articulation, donc la longueur du burst des alvéolaires est supérieure à celle des bilabiales.

2.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donc étudié les rôles relatifs des traits de voisement et de lieu d'articulation lors de la perception de la parole compressée temporellement. Nous avons démontré que le voisement était un bon indice temporel pour discriminer les occlusives voisées et non voisées alors que les changements fréquents rapides de la transition du second formant sont un indice acoustique pertinent pour discriminer le lieu d'articulation des occlusives. Nous avons également mis en évidence le rôle important d'autres indices acoustiques, tel que le bruit d'explosion des occlusives. La nature de cette explosion est également impliquée dans la perception de la parole compressée.

Le traitement auditif temporel de nombreux traits acoustiques rend compte de l'intelligibilité du signal de parole. Dans la suite de cette thèse, nous allons étudier les rôles relatifs des traits de voisement et des transitions sur les déficits perceptuels de langage chez

une population de dyslexiques adultes. La compression temporelle des traits acoustiques sera également utilisée pour tester l'hypothèse du déficit temporel auditif chez les dyslexiques.

Mais avant d'aborder ce Chapitre, nous allons revenir sur la variabilité interindividuelle observée dans l'Expérience 3 entre les participants. Nous nous demandons pourquoi des participants réussissent la tâche alors que d'autres présentent des difficultés à effectuer une identification correcte. Nous allons donc, dans le Chapitre 3, examiner les corrélats auditifs et phonologiques de cette variabilité interindividuelle.

Chapitre 3

Les corrélats auditifs et phonologiques de la variabilité interindividuelle

« Lis avec lenteur à une époque où l'on nous parle de lecture rapide et de lecture en diagonale. »

Jean Prieur

Extrait de Les Maîtres de la pensée positive

« Les yeux sont des témoins plus fidèles que les oreilles. »

Héraclite d'Éphèse

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la variabilité interindividuelle observée dans l'Expérience 3. L'objectif principal est de trouver une explication à cette variabilité. Nous ne nous attendions pas une telle différence entre les individus car nous avons veillé à constituer un groupe homogène de participants normo-entendants et normo-lecteurs. Les participants avaient rapporté n'avoir pas de déficit auditif ni de langage. Cette variabilité pourrait refléter des différences de stratégies ou de capacités dans la reconnaissance des pseudo-mots lorsque les deux indices acoustiques sont réduits simultanément (Expérience 3). Pour tenter d'expliquer ces différences de performances de reconnaissance des pseudo-mots, nous nous sommes intéressés à deux niveaux qui interviennent dans notre tâche d'identification auditive : le traitement auditif de bas niveau et le traitement phonologique à un niveau supérieur. Deux corrélats sont donc abordés dans ce chapitre : un corrélat auditif et un corrélat phonologique. Les participants pourraient présenter des différences significatives au niveau

de leurs capacités auditives et/ou au niveau de leur habileté en lecture. En effet, dans l'Expérience 3, une tâche de reconnaissance auditive de pseudo-mots est proposée aux participants. Cette tâche met donc en jeu, d'une part, un traitement auditif de bas niveau et, par conséquent, nous supposons qu'un déficit du système auditif pourrait rendre compte des mauvaises performances de certains participants. La perte de certaines fréquences critiques dans la perception des sons de parole brouillerait la reconnaissance des pseudo-mots. Nous effectuerons donc un audiogramme tonal de tous nos participants afin d'évaluer leur audition. D'autre part, la tâche demandée aux participants implique l'activation de la voie phonologique et plus précisément, l'activation des représentations phonologiques. En lecture, la représentation orthographique d'un mot est activée directement et des conversions grapho-phonétiques (CGP) sont nécessaires pour accéder à sa représentation phonologique, dans le but de reconnaître le mot. Le lexique orthographique et le lexique phonologique sont interconnectés d'où notre hypothèse selon laquelle les participants avec de mauvaises performances en reconnaissance auditive de pseudo-mots pourraient être également de mauvais lecteurs. L'acquisition des représentations orthographiques et phonologiques lors de l'apprentissage de la lecture, si elle défaille, pourrait refléter des difficultés en reconnaissance de pseudo-mots qui nécessite d'établir des correspondances entre les phonèmes et les graphèmes. Nous évaluerons donc les capacités en lecture de tous nos participants.

Auparavant, dans un premier temps, nous présenterons différents modèles de reconnaissance des mots écrits en lecture qui prêtent un rôle important à la phonologie. Des exemples de modèles cognitivistes classiques seront, tout d'abord, décrits, mettant en évidence l'architecture du système de traitement dans la lecture. Puis, le modèle à double voie, dont ces modèles développementaux sont issus sera expliqué. Et enfin, les modèles connexionnistes seront abordés montrant une conceptualisation plus interactive des différents stades de lecture. Dans un second temps, nous introduirons le test auditif et de lecture. Dans un troisième temps, la partie expérimentale présentera les résultats des tests auditifs et de lecture pour tous les participants. Dans un quatrième et dernier temps, nous discuterons les résultats des tests et nous apporterons un élément de réponse à cette variabilité interindividuelle.

3.2. Les modèles de reconnaissance de mots en lecture

La lecture commence par des traitements visuels qui permettent d'extraire les informations du texte pour aboutir à la compréhension de l'ensemble du texte. Nous pouvons modéliser cette activité de lecture en trois grandes étapes. La première est l'étape d'identification des mots. La seconde étape est l'analyse syntaxique qui permet au lecteur de construire une représentation de la phrase et d'identifier le rôle structurel de chaque mot. La troisième et dernière étape est le calcul sémantique qui permet de relier la signification de la phrase au reste du texte et à l'ensemble de nos connaissances. L'identification d'un mot écrit met en jeu la correspondance entre un signal visuel (le mot écrit) et une représentation dans le lexique mental du signal correspondant. Le stimulus visuel est composé d'une combinaison de signes (les lettres) qui sont dans un premier temps extraits. À chaque lettre correspond une représentation mentale identique à un code abstrait, appelé le code graphémique. Le premier processus est donc l'extraction des signes visuels et l'association avec le code graphémique correspondant. Une fois les codes graphémiques des lettres activés, il existe deux façons d'activer le lexique. Chez le lecteur expert, reconnaître un mot est une activité automatisée qui nécessite soit l'accès aux représentations lexicales par le biais des codes phonologiques (voie indirecte) ou des codes orthographiques (voie directe) comme le modèle de la double voie (Coltheart, 1978), soit l'activation d'un réseau dans le cadre des modèles connexionnistes (Seidenberg & McClelland, 1989). Un lecteur expert possède un lexique mental dans lequel sont stockées les informations relatives aux mots de la langue qu'il a appris. Le lexique mental peut être comparé à un dictionnaire qui se complète au fil de l'apprentissage de la langue.

Les modèles qui décrivent l'apprentissage de la lecture supposent tous que l'utilisation de représentations phonologiques joue un rôle déterminant au cours de l'apprentissage. Dans le cadre des modèles componentiels (en parallèle/en cascade), l'apprentissage de la lecture consiste à mettre en place les deux voies d'accès au lexique, soit par étapes successives chacune étant caractérisée par une stratégie particulière d'identification des mots (logographique, alphabétique, orthographique ; (Frith, 1985)), soit par le recours, à un même niveau, aux processus logographiques et phonologiques afin de permettre l'élaboration du lexique orthographique (Seymour, 1990). Dans le cadre des modèles connexionnistes, l'ensemble des valeurs des connexions entre les unités orthographiques et phonologiques

représente l'ensemble des connaissances que le système a de la langue écrite (Seidenberg, Plaut, Petersen, McClelland, & McRae, 1994). C'est l'expérience de la lecture qui permet la connaissance et l'utilisation des CGP. Même s'il existe des divergences entre ces modèles, ils mettent en avant l'importance des représentations phonologiques dans l'accès au lexique. D'une part, chez les jeunes lecteurs, les processus de conversion graphème-phonème jouent un rôle central dans le décodage du langage écrit. D'autre part, chez le lecteur expert, la représentation orthographique globale de mots familiers permet un accès rapide au sens et à la phonologie.

Les études en imagerie cérébrale fonctionnelle ont permis de distinguer deux réseaux neuronaux importants dans les processus de lecture : une voie pour le traitement orthographique et une voie pour le traitement phonologique (pour une revue, voir (Fiez & Petersen, 1998). Dans des tâches de langage écrit, la voie orthographique est engagée via le cortex occipital médian, le gyrus fusiforme, le cortex pariétal inférieur, le cervelet, le gyrus frontal inférieur ainsi que le gyrus temporal supérieur. Les processus de lecture recrutent d'autres parties du cerveau, de manière non spécifique à la tâche, telles que le système visuel, les champs oculaires frontaux et les régions pariétales. Dans des tâches de langage oral, la voie phonologique est activée : le cortex auditif, le cortex pariétal inférieur, l'insula, le gyrus frontal inférieur et le cervelet. Turkeltaub, Gareau, Flowers, Zeffiro et Eden (2003) explorent les étapes du développement des mécanismes neuronaux impliqués dans l'acquisition de la lecture. Les régions pariéto-occipitales semblent jouer un rôle important dans les premières étapes de l'acquisition de la lecture ainsi que dans l'analyse phonologique des mots. Par ailleurs, les régions inféro-temporales sont recrutées plus tard, par le lecteur expert pour une reconnaissance plus globale du mot.

En modalité auditive, comme en modalité écrite, nous retrouvons des régions cérébrales qui partagent le traitement des deux types de stimuli mais également les représentations cognitives sont interconnectées entre les deux modalités de traitement du langage. Dans notre étude, une tâche de reconnaissance auditive de pseudo-mots va activer ces représentations phonologiques qui sont donc établies lors de l'apprentissage de la lecture et du langage. De plus, ces représentations phonologiques jouent un rôle de médiation entre les représentations orthographiques et l'accès au lexique. Pour mettre en évidence les différentes étapes de la lecture, un modèle à étapes dit développemental va être décrit, ce type de modèle a été largement accepté au début des années 1980.

3.2.1. Le modèle en stades (Frith, 1985)

Le modèle de Frith est un modèle développemental qui rend compte à la fois de l'apprentissage de la lecture et de l'écriture. Frith, dans son modèle, décrit trois stades successifs qui nécessitent la maîtrise du stade antérieur pour avancer dans l'apprentissage :

- Le **stade logographique** qui est la première étape de la lecture. L'enfant ne sait pas lire, il reconnaît les mots grâce à des indices visuels. C'est ce qu'utilise la méthode d'apprentissage « globale » qui permettra à l'enfant de reconnaître les mots de manière globale mais ne lui permet pas de lire car il n'a pas acquis la correspondance graphème-phonème. L'enfant n'a pas recours à la phonologie.
- Le **stade alphabétique** correspond à l'étape de l'acquisition de l'alphabet nécessaire à l'identification des mots. L'enfant fait donc appel à une médiation phonologique. C'est l'écriture qui va permettre l'apprentissage de la lecture, en permettant d'associer la forme visuelle à la forme sonore. L'enfant peut alors utiliser les correspondances entre les graphèmes et les phonèmes donc il peut lire les mots connus ou rare mais aussi les pseudo-mots, cependant il a des difficultés à lire des mots irréguliers et fait donc des erreurs fréquentes de régularisation. La phonologie joue donc un rôle primordial dans cette étape de l'apprentissage de la lecture.
- Le **stade orthographique** rend compte d'une lecture experte. Le lecteur expert utilise des processus linguistiques rapides (400 à 450 mots identifiés à la minute) et économiques. L'enfant est apte à reconnaître un mot comme une entité et se crée un lexique orthographique. L'enfant n'a pas recours à la phonologie à ce stade.

Ce type de modèle en stades a été abandonné au profit de modèles plus dynamiques et interactifs. En effet, le modèle de Frith ne permet pas d'envisager la coexistence des différents stades dès le début de l'apprentissage de la lecture. La notion de succession stricte des étapes est remise en cause, ce qui laisse apparaître des modèles dans lesquels deux procédures de traitement coexistent en même temps. Les processus orthographique et phonologique sont activés en parallèle (Coltheart, 1978 ; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001). Par ailleurs, les modèles connexionnistes (McClelland & Rumelhart, 1981 ; Seidenberg & McClelland, 1989) mettent en évidence des interactions entre les unités spécialisées dans le traitement orthographique, phonologique et sémantique. Toutes les connaissances sur le mot forment donc un réseau d'activation synchronisé de façon automatique.

3.2.2. Le modèle de la double voie (Coltheart, 1978)

Les modèles développementaux sont issus du modèle de la double voie (« *dual route* »), le stade orthographique correspond au fonctionnement du lecteur expert tel qu'il est décrit dans ce modèle. Le modèle de la double voie met en jeu deux voies parallèles et indépendantes permettant de traiter l'ensemble des items que peut rencontrer le lecteur expert (Figure 31).

(1) La voie lexicale (voie directe ou voie par adressage) serait dédiée aux mots connus et permettrait l'accès à leur connaissance globale à partir d'un lexique mental élaboré durant l'apprentissage de la lecture. Le code orthographique intervient dans ces processus d'identification des mots mais pas le code phonologique.

(2) La voie non-lexicale (voie indirecte ou voie par assemblage) serait plutôt appliquée aux mots rares et réguliers ainsi qu'aux pseudo-mots. Chaque item serait alors traité séquentiellement, par conversion de ses graphèmes en phonèmes. Il existe des codes phonémiques pour identifier les unités de parole (les phonèmes) reliés aux codes graphémiques utilisés en lecture. La CGP est possible grâce à des règles de correspondance mises en place par le lecteur ce qui lui permet d'établir rapidement des associations entre un graphème et un phonème ou inversement. L'inverse serait utilisé par nos participants dans notre tâche de reconnaissance auditive de pseudo-mots. Ensuite, les codes phonémiques activés doivent être assemblés pour former une chaîne qui pourra être comparée aux entrées phonologiques du lexique mental.

Cette voie phonologique est lente et peu utilisée chez le lecteur expert qui utilise principalement la voie orthographique, même si l'hypothèse la plus largement partagée est que les deux voies sont activées simultanément et qu'il existe une « course » entre les deux (traitement en parallèle). Mais dans le cas de l'identification de nouveaux mots ou dans l'apprentissage d'une langue étrangère, la voie phonologique est essentielle dans l'identification des mots même si elle est plus lente. Un bon lecteur utilisera les deux voies en parallèle mais, par exemple, l'individu dyslexique aura l'une des deux voies perturbée et il utilisera des stratégies de compensation (cf. Chapitre 4).

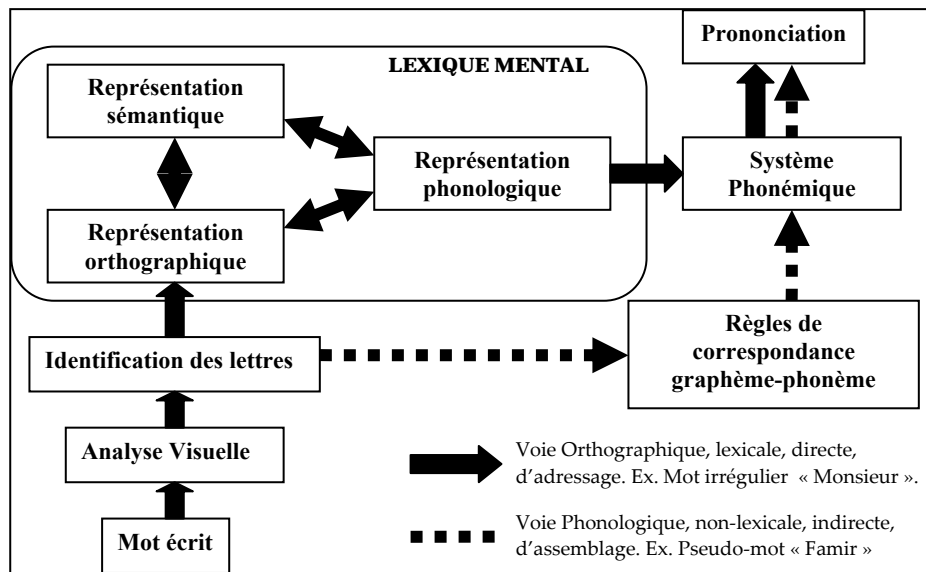


Figure 31 : Modèle de la double-voie (Coltheart, 1978).

3.2.3. Le modèle de la double voie en cascade (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001)

Le *Dual Route Cascade Model* (DRC) est la version implémentée du modèle à double voie de Coltheart (1978). Comme le nom l'indique, les informations sont transmises en cascade d'un niveau à un autre et permettent ainsi la reconnaissance de pseudo-mots (qui par définition ne sont pas stockés dans le lexique mental). Ce modèle fait référence à trois voies : deux voies lexicales (lexicale sémantique et lexicale non-sémantique) et une voie non-lexicale (correspondance graphème-phonème). En ce qui concerne la voie lexicale non-sémantique, les traits visuels correspondants au mot vont activer les unités lettres. Ces dernières vont activer le lexique orthographique qui va lui-même activer le lexique phonologique sans passer par le système sémantique. Puis le lexique phonologique va activer les unités phonémiques correspondantes. Le système sémantique est activé seulement dans la voie lexicale sémantique. Quant à la voie non-lexicale, elle convertit la suite de lettres en une suite de phonèmes grâce à des règles de conversion grapho-phonémiques. Les différentes unités qui composent le modèle interagissent entre elles et leurs connexions peuvent être excitatrices ou inhibitrices (Figure 32). Dans ce modèle, nous remarquons une utilisation conjointe des deux codes orthographique et phonologique.

Remarquons également que ce modèle DRC simule parfaitement deux types de dyslexies : la dyslexie phonologique qui se traduit par des difficultés à lire des pseudo-mots et la dyslexie de surface qui rend compte de difficultés à lire des mots irréguliers (cf. Chapitre 4 section

4.2.5.). La dyslexie phonologique serait un trouble spécifique de la voie non-lexicale et la dyslexie de surface, un trouble spécifique de la voie lexicale.

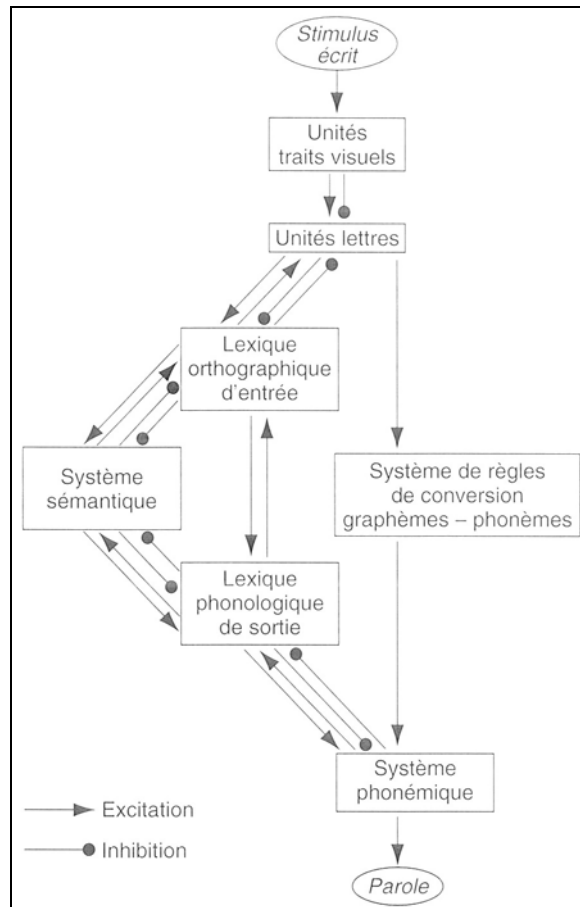


Figure 32 : Modèle de la « DRC » par Coltheart et al. (2001). *Figure tirée de Ferrand (2001).*

3.2.4. Le modèle à activation interactive (McClelland & Rumelhart, 1981)

Ce modèle est un des premiers modèles connexionnistes des années 1980, qui utilise des représentations locales c'est-à-dire que chaque trait visuel et acoustique, chaque lettre et phonème ainsi que chaque mot est représenté par une unité distincte. C'est un modèle hiérarchique à activation en parallèle et également à activation interactive. Ce modèle présente une architecture triangulaire composée des codes orthographique, phonologique et sémantique. Les unités orthographiques infralexicales (lettres ou groupes de lettres) sont connectées aux unités phonologiques (phonèmes ou groupes de phonèmes), toutes les deux connectées aux unités lexicales (les mots stockés dans le lexique mental). Par conséquent, il existe des connexions directes entre les unités orthographiques et les unités mots ainsi qu'avec les unités phonologiques. Ces dernières sont également directement connectées avec les unités mots. Le traitement du mot est influencé par des informations de bas niveau mais

aussi par des informations de haut niveau. Les unités qui composent le modèle sont interconnectées et bidirectionnelles et il existe deux types de connexions : excitatrices et inhibitrices. Les connexions excitatrices se retrouvent globalement entre les différents niveaux alors que les connexions inhibitrices sont présentes à l'intérieur des niveaux. Au niveau lexical, le concept de compétition existe entre les mots mais le mécanisme d'inhibition lexicale permet l'identification du mot cible en éliminant les autres candidats (Figure 33).

Les connexions sont préétablies et ne varient pas, elles sont figées. Ce modèle n'évolue pas et n'apprend pas. Par contre, c'est un modèle dynamique qui permet d'étudier le déroulement temporel des traitements. De plus, ce modèle met en évidence l'activation simultanée des deux unités indépendantes : orthographique et phonologique.

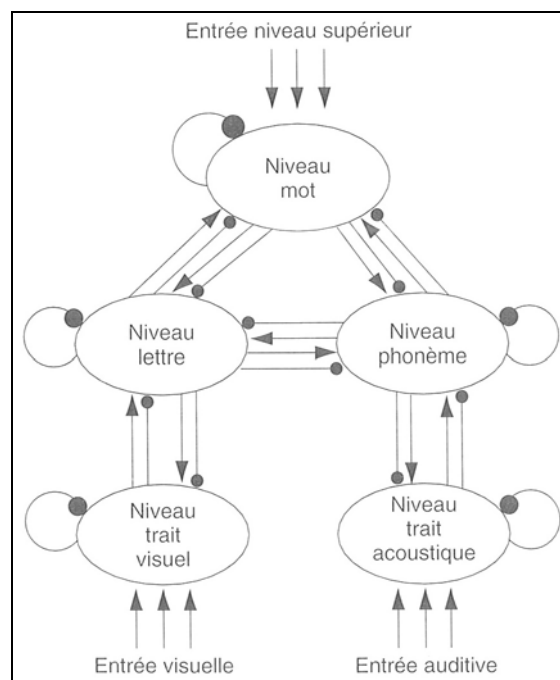


Figure 33 : Version complète du modèle à activation interactive (McClelland & Rumelhart, 1981). *Figure tirée de Ferrand (2001).*

3.2.5. Le modèle à traitement parallèle distribué (Seidenberg & McClelland, 1989)

Le modèle connexionniste princeps à traitement parallèle et distribué, le *Parallel Distributed Processing* (PDP) utilise des représentations distribuées et des connexions variables, contrairement au modèle de McClelland et Rumelhart (1981). Ce modèle utilise les règles de fonctionnement des réseaux neuronaux et le système calcule les connexions entre les unités orthographique, phonologique et sémantique. Au début de l'apprentissage de la lecture, la valeur de ces connexions est d'abord aléatoire, puis la confrontation avec l'écrit va modifier

la valeur et la nature des connexions. Il existe donc une procédure d'apprentissage qui va pouvoir corriger les erreurs. L'originalité de ce modèle réside dans la notion de représentation distribuée des informations lexicales (Figure 34). En effet, contrairement aux autres modèles qui présentent des lexiques séparés contenant les informations orthographique, phonologique et sémantique, le modèle de Seidenberg et McClelland procède à un calcul d'une carte d'activation orthographique, phonologique et sémantique distribuée. Chaque mot correspond à un pattern d'activation d'un ensemble d'unités mais chaque unité est utilisée dans la représentation d'un grand nombre de mots. L'influence de la phonologie dans ce modèle va dépendre de la fréquence lexicale du mot mais également de la rapidité de traitement des mots dans le temps. Un mot fréquent ne va pas nécessiter l'activation de la phonologie car le mot sera catégorisé avant que les connexions ne s'établissent car les connexions orthographiques auront suffi à identifier le mot. Alors que pour les mots rares, la phonologie est activée par l'orthographe. Dans ce dernier cas, la connexion entre la phonologie et la sémantique est plus lente car elle est obligatoirement précédée par des connexions entre l'orthographe et la phonologie. La particularité de ce modèle est la distribution des représentations orthographique, phonologique et sémantique. La lecture d'un mot correspond à un pattern d'activation des représentations dispersées dans le cerveau du lecteur.

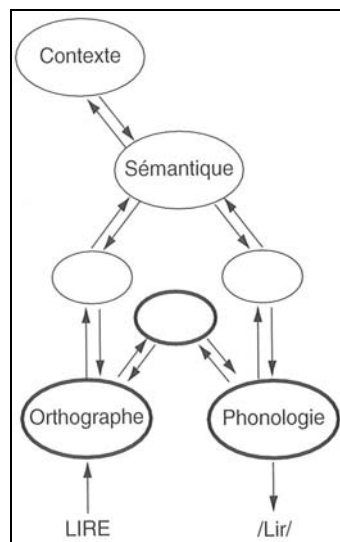


Figure 34 : Modèle à traitement parallèle distribué (Seidenberg & McClelland, 1989). *Figure tirée de Ferrand (2001).*

À l'inverse du modèle double voie, ce modèle suppose qu'un système unique permet de lire à la fois les mots et les pseudo-mots, en se basant sur la connaissance des mots. Même s'il existe des divergences entre ces modèles, ils mettent en avant l'importance des représentations phonologiques dans l'accès au lexique.

3.3. Le test auditif et de lecture

3.3.1. L'évaluation des seuils auditifs

La mesure des seuils auditifs permet de détecter des pertes auditives chez les participants. Les seuils auditifs sont obtenus pour des sons de différentes fréquences (de 125 à 8000 Hz). Un seuil supérieur à 20 dB HL reflète une perte auditive sur la fréquence testée. Comme nous l'avons mentionné dans le Chapitre 1, un son arrivant à l'oreille va être traité selon les différentes dimensions acoustiques qui le composent : la fréquence, l'intensité et le temps. L'information fréquentielle est représentée le long de la cochlée dans l'oreille interne. La tonotopie cochléaire correspond à la représentation des hautes fréquences à la base et des basses fréquences à l'apex. Le traitement du signal sonore va donc consister à un recrutement et une activation des cellules ciliées de la cochlée situées dans la région correspondante à la fréquence caractéristique du stimulus. L'évaluation des seuils auditifs pour les différentes fréquences testées permettra de mettre en évidence ou non un trouble auditif d'origine endocochléaire ou rétrocochléaire. Si une anomalie est détectée, des distorsions du signal peuvent retentir sur la compréhension de la parole.

3.3.2. Le logiciel ECCLA (Évaluation des Capacités Cognitives du Lecteur Adulte)

Pour l'évaluation des capacités de lecture, les chercheurs utilisent de nombreux tests, la plupart adaptés aux enfants. À notre connaissance, peu de tests pour adultes ont été développés. Les tests de lecture permettent d'identifier les troubles liés à l'apprentissage de la lecture et d'établir des diagnostics, comme par exemple la dyslexie. La plupart du temps, les diagnostics de dyslexie se font très tôt lors de l'apprentissage de la lecture d'où la grande proportion de tests adaptés aux enfants. Cependant, des diagnostics peuvent être plus tardifs, à l'âge adulte, dans des cas où les personnes n'ont jamais été diagnostiquées ou ont eu un mauvais diagnostic durant leur enfance.

Pour notre étude, nous avons utilisé le logiciel ECCLA (Évaluation diagnostic des Capacités Cognitives du Lecteur Adulte) conçu par Zagar, Jourdain et Lété (1995). Ce logiciel évalue l'automatisation des processus impliqués dans la reconnaissance des mots chez l'adulte et permet donc de déterminer la ou les sources de difficultés d'un lecteur. Dans ce test, les auteurs ont choisi d'insister sur les processus d'identification des mots par le biais des conversions grapho-phonémiques c'est-à-dire que les lecteurs sont amenés très fréquemment

à décoder les mots. Deux raisons essentielles justifient ce choix. La première renvoie au fait que la reconnaissance visuelle des mots constitue un des processus centraux de la lecture. La seconde raison est liée au fait que les études sur les mauvais lecteurs et celles sur les dyslexiques mettent principalement en évidence des difficultés dans la maîtrise des CGP (et plus généralement au niveau phonologique, voir par exemple Sprenger-Charolles & Casalis, 1996 ; Vellutino, 1979).

3.4. Problématique et Hypothèses

Dans le chapitre précédent, les différentes expériences menées, nous ont permis, notamment, de mettre en évidence une variabilité interindividuelle importante des performances. Cette observation suggère que les individus possèdent des capacités et des stratégies d'identification différentes. Ces différences observées nous amènent à nous poser la question de la nature des processus à l'origine de cette variabilité. Deux hypothèses sont émises : une première différence pourrait être observée à une étape de bas niveau de la perception auditive et la seconde différence pourrait se situer à une étape de plus haut niveau cognitif. En effet, un dysfonctionnement du système auditif chez certains individus pourrait refléter la variabilité interindividuelle des performances d'identification des stimuli. Pour tester l'hypothèse d'un corrélat auditif, nous procéderons à un audiogramme tonal qui permettra de vérifier les seuils auditifs des participants, notamment dans la zone conversationnelle (entre 200 et 4000 Hz). Une autre explication à cette variabilité pourrait être associée à un déficit phonologique lié à l'aptitude des participants en lecture. Plus précisément, au moment de la conversion graphème-phonème, aussi bien dans la modalité auditive que visuelle, un déficit lors de cette étape cognitive pourrait rendre compte des différences interindividuelles de reconnaissance des pseudo-mots. Un test de lecture (logiciel ECCLA) sera utilisé pour déterminer les capacités de chaque participant à chacune des étapes de la lecture (visuelle, orthographique, phonologique et sémantique). Pour résumer, les différences entre les participants pourraient être liées autant à des déficits de langage (de type « dyslexie ») qu'à des troubles auditifs (perte de décibels sur certaines fréquences). Nous nous demandons s'il existe un lien entre l'audition et les performances cognitives de reconnaissance de la parole et/ou un lien entre la lecture et les performances cognitives d'identification de la parole compressée.

3.5. Partie expérimentale

Pour tester ces deux hypothèses, nous avons repris les données des participants de l'Expérience 3 (cf. Chapitre 2) qui présentaient la plus grande variabilité interindividuelle des performances. Certains identifiaient très bien les items alors que d'autres étaient moins performants dans la reconnaissance auditive des pseudo-mots.

3.5.1. Méthode

3.5.1.1. Participants

Deux groupes de 12 sujets ont été sélectionnés sur leurs performances d'identification des consonnes au taux de compression à 25%, dans l'Expérience 3. Les participants correspondant aux performances extrêmes ont été gardés pour ces tests complémentaires et classés en deux groupes distincts : le groupe Haute Performance (HP) ayant une moyenne de taux d'identification correcte égale à 85.9% et le groupe Basse Performance (BP) avec une moyenne de 63.5% (Figure 35). Les deux groupes sont significativement différents ($t_{22} = 5.61$, $p < .001$). Les 12 participants du groupe HP étaient âgés de 20 à 28 ans (7 hommes, moyenne d'âge = 23.9 ans, écart-type = 2.5) et les 12 participants du groupe BP étaient âgés de 21 à 32 ans (2 hommes, moyenne d'âge = 25.8, écart-type = 3.5). Les deux groupes ne diffèrent pas par leur moyenne d'âge ($t_{22} = -1.55$, $p = 0.14$). Aucun participant n'avait d'antécédent connu de troubles auditifs ou de troubles du langage.

3.5.1.2. Procédure

Chaque sujet a passé un audiogramme et un test d'évaluation des capacités cognitives de lecture (ECCLA). Ces deux tests ont pour objectifs, d'une part, de valider la normalité des capacités auditives et de lecture des sujets et d'autre part, de mettre en évidence d'éventuelles corrélations entre les performances comportementales observées chez nos participants et leurs capacités (1) auditives et (2) de lecture mesurées. Le test de lecture étant relativement long (environ 1h45), nous l'avons divisé en deux parties séparées par le test d'audiométrie tonale qui durait 15 minutes.

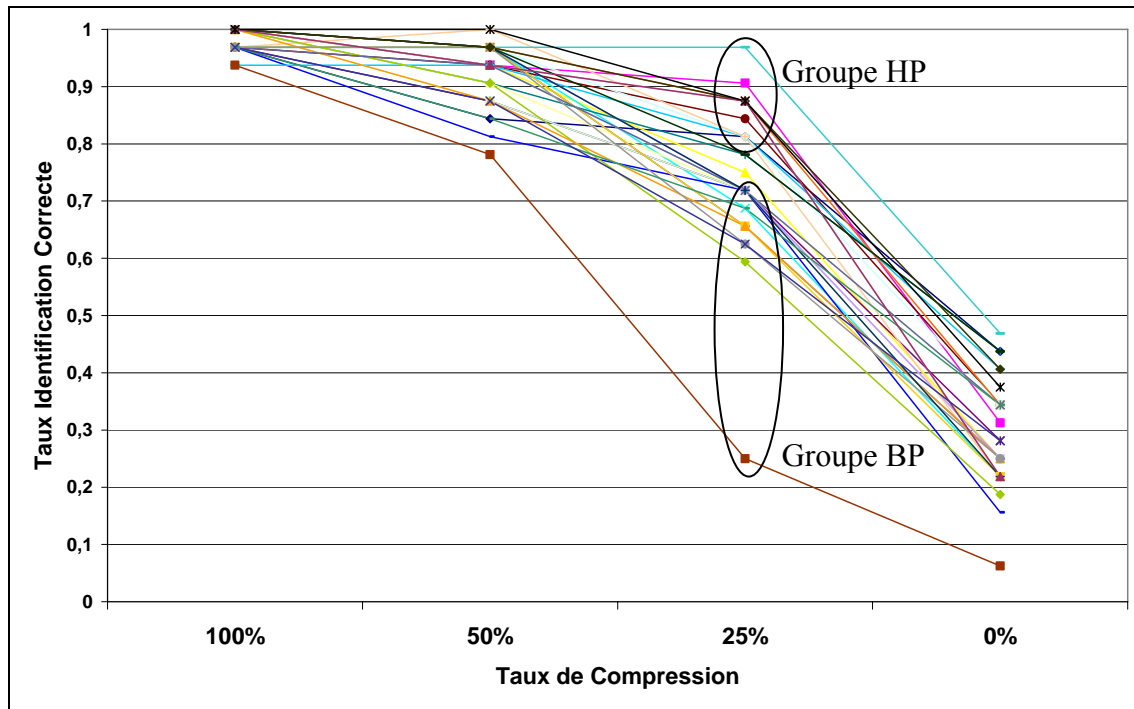


Figure 35 : Variabilité interindividuelle, des 32 participants de l'Expérience 3, observée pour l'identification des consonnes au taux de compression à 25%. Les deux groupes HP et BP comportent chacun 12 sujets.

3.5.1.3. L'audiométrie tonale

Méthode

L'audiométrie tonale permet de vérifier la fonctionnalité du système auditif périphérique en évaluant les capacités auditives pour chaque oreille. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un audiomètre clinique à deux voies de type Interacoustics AC 33, et d'un casque Telephonics TDH 39P.

Procédure

L'audiométrie tonale est utilisée de manière routinière dans le domaine clinique. Le participant se place dos à l'expérimentateur et se muni d'un casque et d'un bouton pressoir. L'audiomètre génère des sons purs à différentes intensités. Chaque oreille est testée l'une après l'autre et l'intensité des sons diminue progressivement jusqu'à ce que le sujet ne puisse plus l'entendre : c'est le seuil d'audition. L'expérimentateur envoie, dans une des oreilles définies au préalable, un son pur avec une fréquence spécifique à une intensité sonore qui est perceptible dans le silence (environ 30 dB). Le participant doit appuyer sur le bouton pressoir à chaque fois qu'il pense percevoir un son dans le casque. L'expérimentateur est averti par un signal lumineux lorsque le sujet appuie sur le bouton pressoir. L'expérimentateur peut alors diminuer progressivement l'intensité sonore, toujours à la même fréquence, jusqu'à ce que le

participant ne perçoit plus le stimulus. À ce moment là, l'expérimentateur peut noter, sur un audiogramme, l'intensité du seuil d'audition (en dB HL) de la fréquence testée (en Hz). L'audiogramme est une représentation graphique des capacités auditives (Figure 36). Ensuite, l'expérimentateur renouvelle cette procédure pour d'autres fréquences et pour l'autre oreille. Pour notre étude, nous avons mesuré les seuils d'audition subjectifs des participants pour les fréquences suivantes : 125, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 6000 et 8000 Hz. Les tests ont été pratiqués au laboratoire Dynamique Du Langage dans une pièce d'enregistrement insonorisée afin de s'isoler des bruits ambiants. Le seuil moyen d'audition est fixé à 20 dB HL. Au dessus de ce seuil, une perte d'audition est constatée. Une audition normale dans le silence, chez des personnes de moins de 30 ans, devrait correspondre à des seuils auditifs inférieurs à 20 dB HL entre 125 Hz et 8 kHz.



Figure 36 : Audiogrammes de l'oreille droite (OD) et de l'oreille gauche (OG). Le seuil d'audition normal est fixé à 20 dB HL. L'axe vertical représente la perte auditive exprimée en décibels (dB HL). Plus on s'éloigne de 0 dB HL, plus la perte est importante. Sur l'axe horizontal, les fréquences en hertz (Hz) sont indiquées.

3.5.1.4. Test de lecture

Méthode

Pour l'évaluation des capacités de lecture, nous avons utilisé le logiciel ECCLA (Évaluation diagnostic des Capacités Cognitives du Lecteur Adulte) conçu par Zagar, Jourdain et Lété (1995). Ce logiciel permet de déterminer la ou les sources de difficultés d'un lecteur. Dans ce cadre, la lecture est conçue comme une activité cognitive modélisée par une suite d'étapes de traitements visuels, phonologiques et lexicaux.

Procédure

Le test est composé de 15 épreuves divisées en 4 passations durant lesquelles nous enregistrons les temps de réaction des sujets (cf. Annexe 1). Différentes épreuves permettent l'étude de chaque étape de traitement. Pour l'étape concernant les traitements visuels, les épreuves portent sur le codage des lettres, le jugement d'identité de lettres et le jugement de similitude de deux ensembles de lettres, prononçables ou non. Pour l'étude de l'étape des

traitements phonologiques, les épreuves sont une tâche de décision phonologique à choix forcé et une tâche de décision lexicale phonologique. De nombreuses épreuves examinent l'étape des traitements lexicaux : une tâche d'amorçage orthographique, des tâches de décision lexicale avec des effets de fréquence, de régularité et de classe grammaticale, une tâche de décision phonologique à choix forcé et une tâche de catégorisation sémantique. De plus, les caractéristiques de la lecture (vitesse, temps de lecture, effet de fréquence, effet du contexte) sont étudiées lors d'une tâche de lecture de textes mot à mot et une tâche de lecture de mots hors contexte.

3.5.2. Résultats

3.5.2.1. L'audiométrie Tonale

Tous les participants ont passé un audiogramme, nous avons relevé les seuils auditifs de chacun des participants pour les 11 fréquences (125, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 6000 et 8000 Hz) et pour les 2 oreilles. Les seuils auditifs ont été moyennés pour chaque groupe, par oreille et par fréquence. Les résultats sont représentés sur la Figure 37.

Une ANOVA incluant comme facteurs le Groupe (HP/BP), l'Oreille (Droite/Gauche) et la Fréquence (11) a été réalisée. Nous n'avons pas observé d'effet du Groupe ou de l'Oreille [$F(1,11) = 0.02$, ns ; $F(1,11) = 0.28$, ns], par contre, l'effet de Fréquence est significatif [$F(10,110) = 2.83$; $p < .01$]. Globalement, aucune interaction n'est significative. Nous observons cependant une diminution du seuil auditif pour les hautes fréquences (à partir de 4000 Hz), en particulier pour 6000 Hz. Un test de comparaison a posteriori LSD sur l'interaction triple Groupe x Oreille x Fréquence a mis en évidence des différences significatives : à 4000 et à 6000 Hz pour l'oreille droite, le groupe BP a un seuil auditif moyen significativement plus haut que le groupe HP (4000 Hz : BP = 5 dB, HP = 1.7 dB ; $p < .05$ et 6000 Hz : BP = 10 dB, HP = 6.7 dB ; $p < .05$) ainsi qu'à 6000 Hz pour l'oreille gauche (BP = 10.8 dB, HP = 4.6 dB ; $p < .001$) (Figure 37).

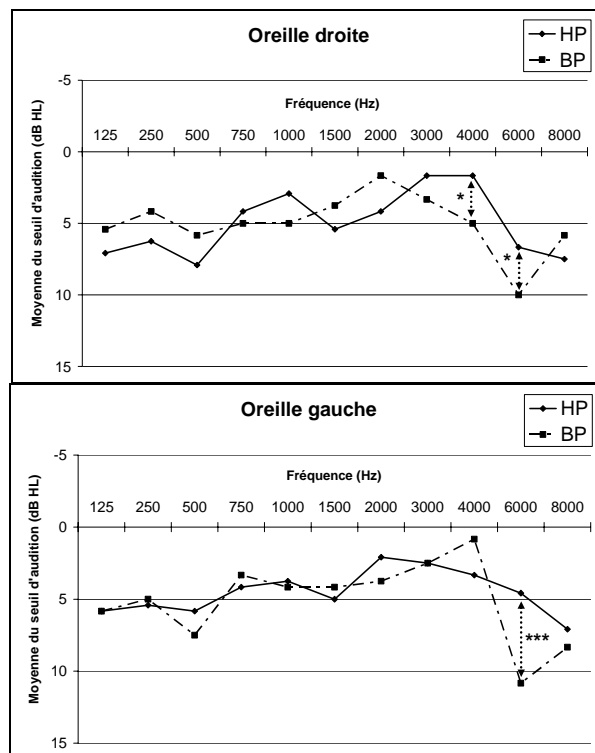


Figure 37 : Audiogrammes des deux oreilles pour les deux groupes. On note des différences significatives entre les groupes à 4000 et 6000 Hz (* $p < .05$; *** $p < .001$).

3.5.2.2. Les capacités de lecture

Le test ECCLA a fourni une importante masse de données qui ont été analysées de manière exhaustive. Nous vous présenterons donc uniquement les résultats significatifs. Le test t pour des échantillons indépendants, qui compare les moyennes des groupes pour chaque indicateur, a montré une différence significative pour un indicateur seulement, au niveau de l'étape visuelle. L'indicateur « visuel » montre que la reconnaissance visuelle des mots est plus efficace pour le groupe HP (6.7% d'erreurs) que pour le groupe BP (13.3%) lorsque nous leur demandons de juger de la similitude de deux groupes de lettres non prononçables qui diffèrent uniquement par une seule lettre (p. ex. BCDTF-BCDTG) ($t_{22} = -2.23$, $p < .05$; Figure 38). Ce résultat est intéressant car cette différence entre les deux groupes n'est pas observée dans le cas où les suites de lettres sont prononçables.

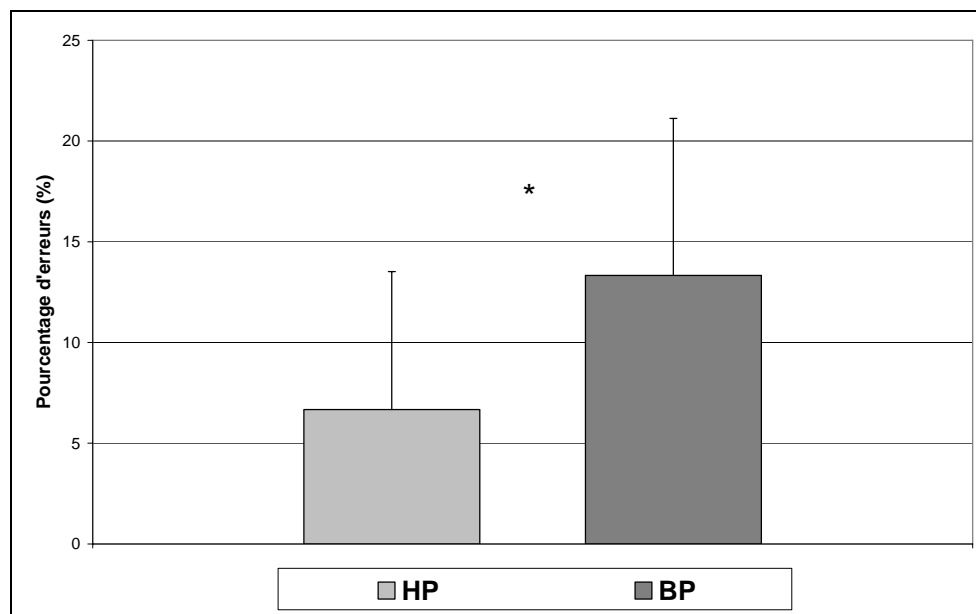


Figure 38 : Pourcentages d'erreurs pour les deux groupes HP et BP dans une tâche visuelle de jugement de similitude entre deux séries de lettres non prononçables (* $p < .05$).

À un niveau descriptif/qualitatif, nous avons observé qu'un sujet sur quatre du groupe BP présentait un taux d'erreurs important (supérieur à 50% alors que la norme est à 32%) dans une tâche de jugement de similitude (traitement visuel) lorsque deux lettres étaient inversées. De même, 3 autres sujets du groupe BP montraient un temps de réponse plus long (supérieur à 800 ms alors que la norme est à 400 ms) dans une tâche de décision phonologique à choix forcé (traitement phonologique) pour les pseudo-mots de deux syllabes par rapport à ceux d'une seule syllabe. D'ailleurs, le temps de réponse du groupe BP est plus long que celui du groupe HP (BP = 544 ms et HP = 434 ms) mais cette différence n'est pas significative.

3.5.2.3. Les corrélations

Comportement/Audition

Un test de corrélation de Pearson n'a montré aucune corrélation entre les performances des sujets et leurs résultats audiométriques. En effet, tous nos sujets avaient une bonne audition, aucun ne présentait de déficit important, ou même de variation, pouvant être corrélés à de mauvaises performances de reconnaissance auditive des pseudo-mots.

Comportement/Lecture

Par contre, le test de corrélation de Pearson entre les performances des deux groupes (24 sujets) lors de la tâche d'identification des phonèmes de l'Expérience 3 et les valeurs des 65 indicateurs obtenus suite au test de lecture nous montrent des corrélations significatives. En effet, nous avons observé une corrélation négative significative, d'une part, entre la performance des sujets dans l'Expérience 3 et le pourcentage d'erreurs dans une tâche de jugement d'identité de lettres pour la condition où les lettres sont proches visuellement ($r = -0.44$, $p < .05$), et d'autre part, entre la performance d'identification et le temps de réaction moyen dans la tâche de jugement de similitude de deux ensembles de lettres prononçables ($r = -0.57$, $p < .01$). Cependant, nous avons noté que ces corrélations étaient nettement plus marquées voir opposées pour le groupe BP. Donc, nous avons décidé d'étudier les deux groupes séparément.

Les corrélations du groupe HP

Les résultats du groupe HP montrent uniquement des corrélations entre les performances de l'Expérience 3 et des indicateurs de l'étape de lecture. D'une part, nous observons une corrélation négative entre les résultats à l'Expérience 3 et le temps de lecture de mots fréquents ($r = -0.62$, $p < .05$). Plus le mot est fréquent, plus le temps de lecture est rapide et meilleures sont les taux d'identification correcte (Figure 39). D'autre part, le groupe HP montre une autre corrélation négative entre les performances d'identification et le style de lecture ($r = -0.58$, $p < .05$) c'est-à-dire que les sujets HP montrent de meilleurs résultats lorsque leur lecture est rapide (Figure 40). Il semble donc que le groupe HP soit constitué de très bons lecteurs.

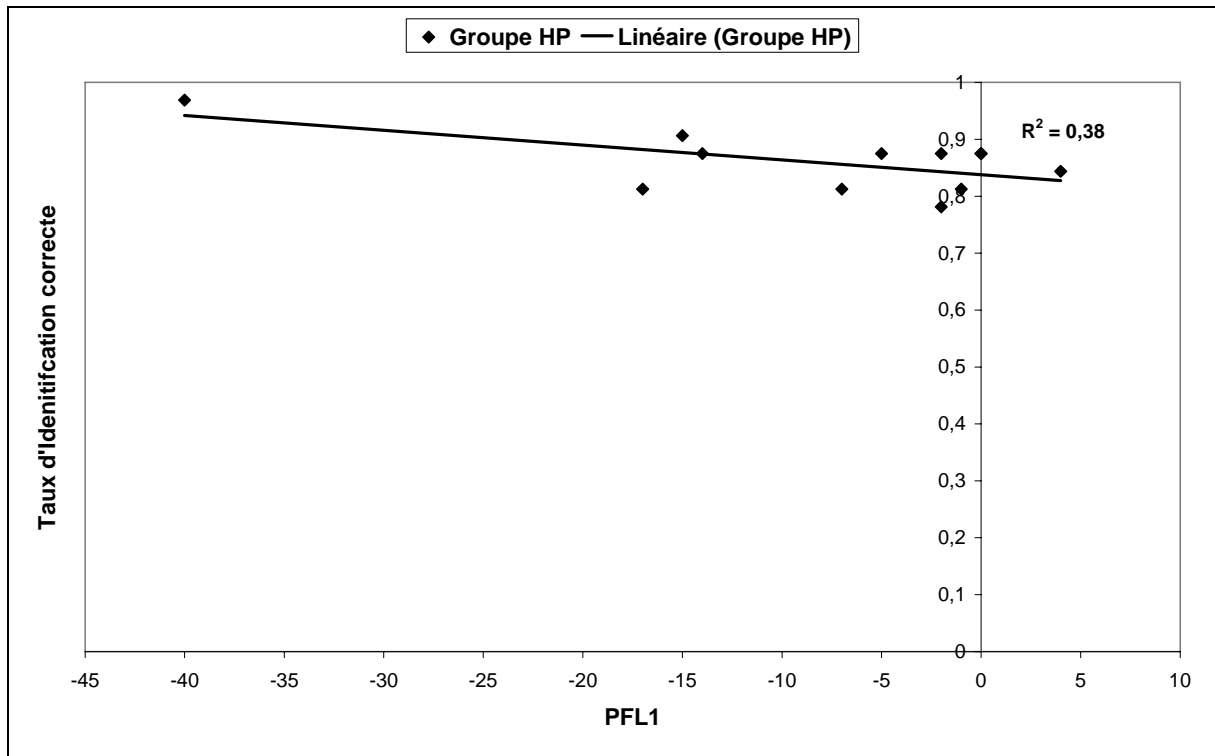


Figure 39 : Corrélation négative entre les performances d'identification dans l'Expérience 3 et le temps de lecture de mots fréquents = PFL1 (Courbe de tendance linéaire).

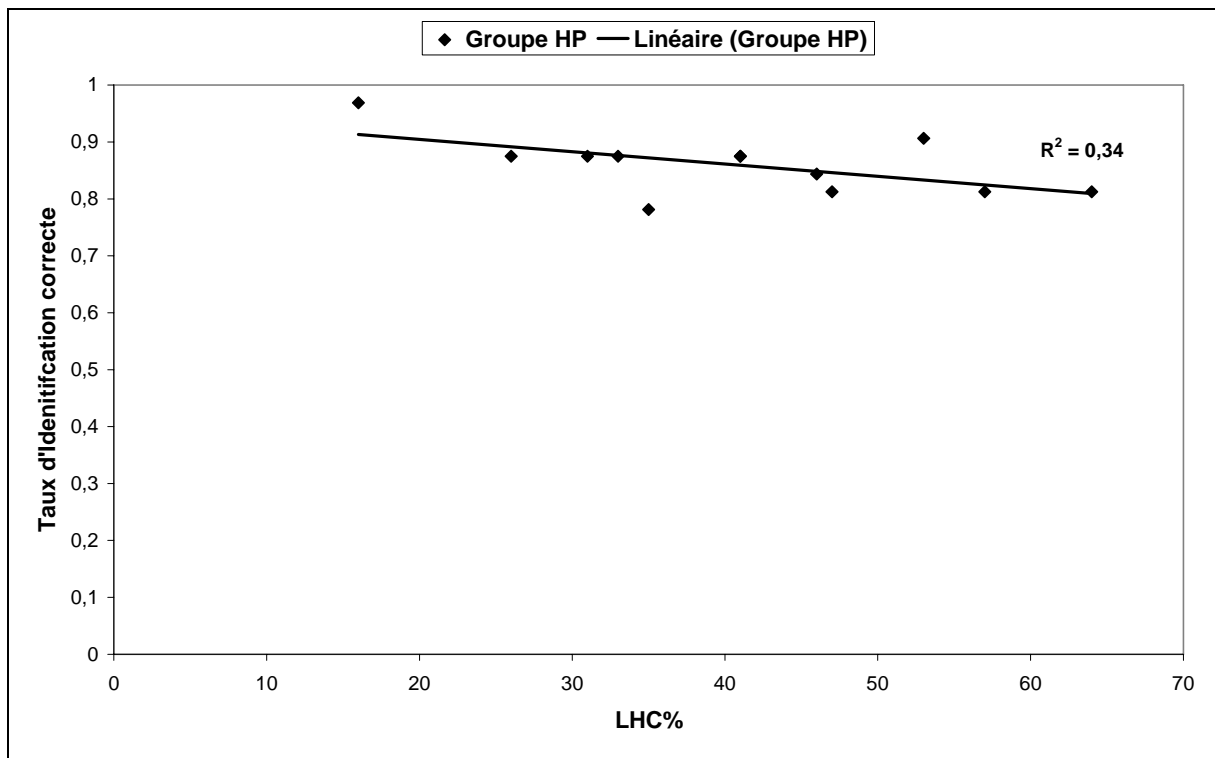


Figure 40 : Corrélation négative entre les performances dans l'Expérience 3 et le style de lecture = LHC% (Courbe de tendance linéaire).

Les corrélations du groupe BP

Les résultats du groupe BP montrent de nombreuses corrélations entre leurs performances dans l'Expérience 3 et des indicateurs des étapes de reconnaissance des mots. La première corrélation négative est observée pour une tâche de jugement de similitude de deux suites de lettres prononçables ($r = -0.82$, $p < .01$). La diminution des performances d'identification des phonèmes est liée à une augmentation des temps de réponse (Figure 41).

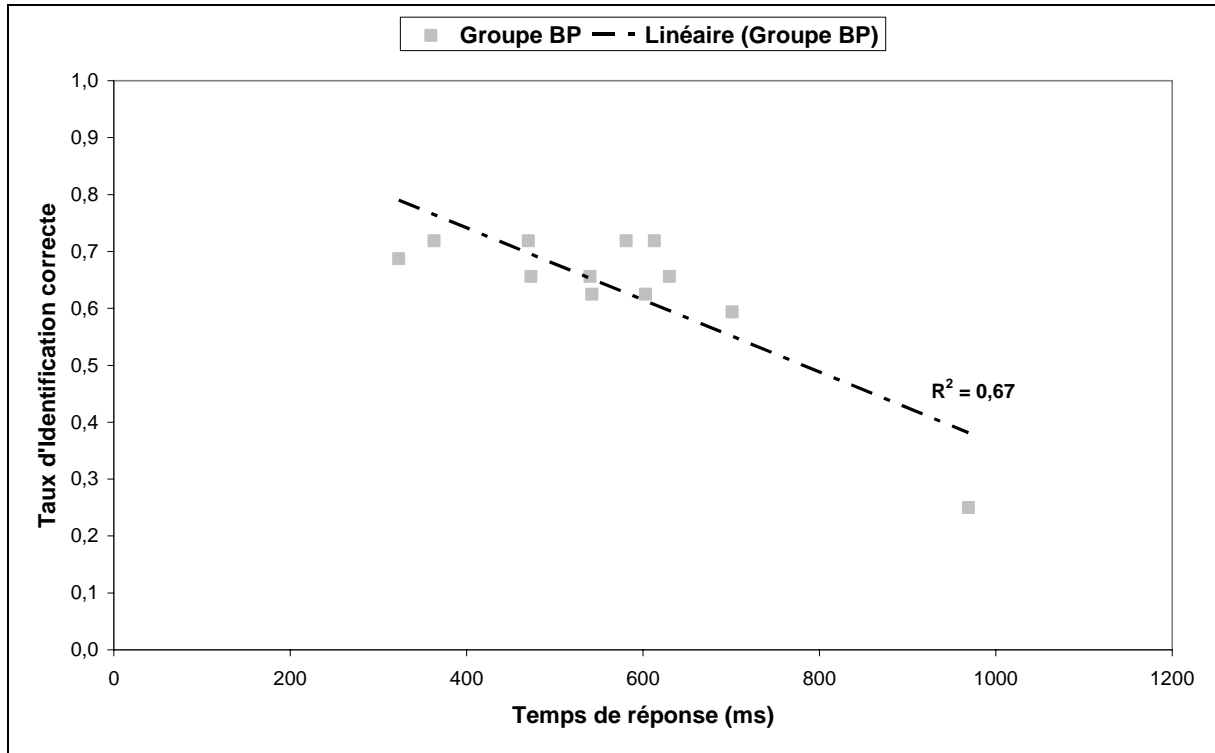


Figure 41 : Corrélation négative entre les performances d'identification dans l'Expérience 3 et le temps de réponse dans une tâche de jugement de similitude de 2 suites de lettres prononçables (Courbe de tendance linéaire).

De même, dans une tâche de décision phonologique ("est-ce que c'est la même prononciation ?"), nous observons une corrélation négative ($r = -0.60$, $p < .05$). La diminution des performances dans l'Expérience 3 est reliée à une augmentation des temps de réponse (Figure 42).

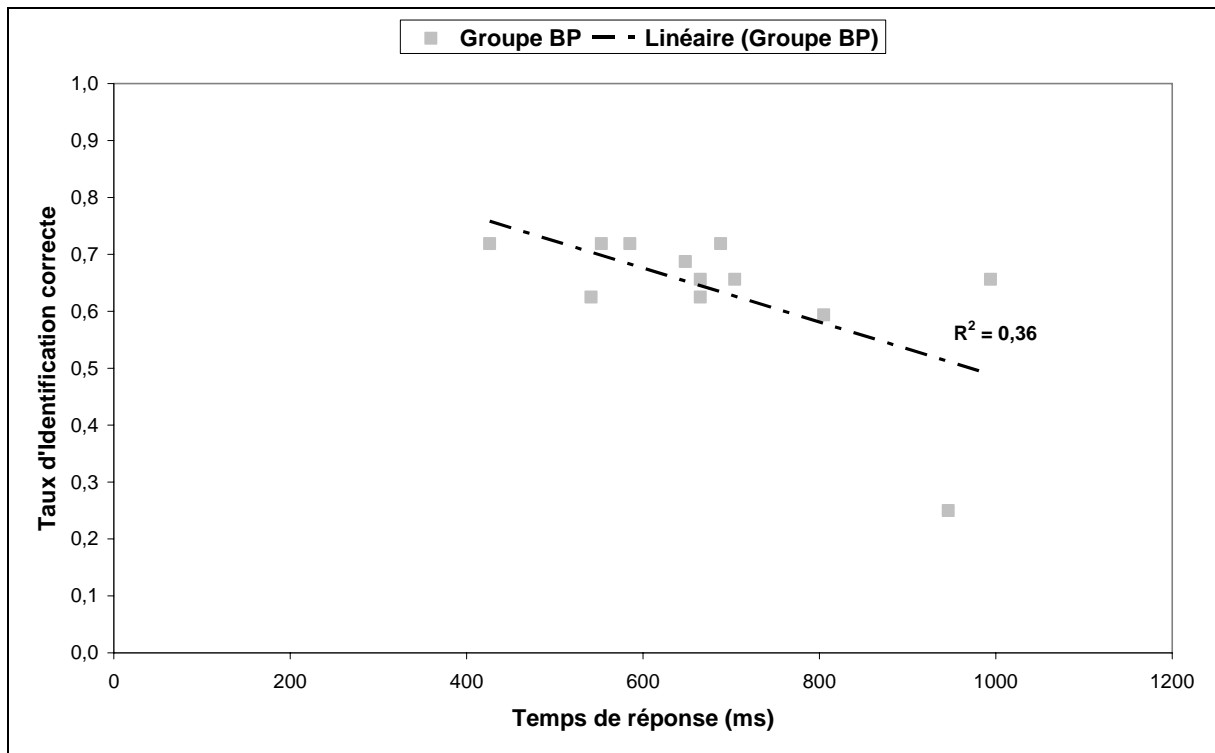


Figure 42 : Corrélation négative entre les performances dans l'Expérience 3 et le temps de réponse dans une tâche de décision phonologique (Courbe de tendance linéaire).

De la même manière, un résultat très intéressant est la corrélation négative observée avec les temps de décision lexicale ($r = -0.67$, $p < .05$). La diminution des performances dans l'Expérience 3 est corrélée à une augmentation des temps de réponse pour les mots irréguliers (Figure 43).

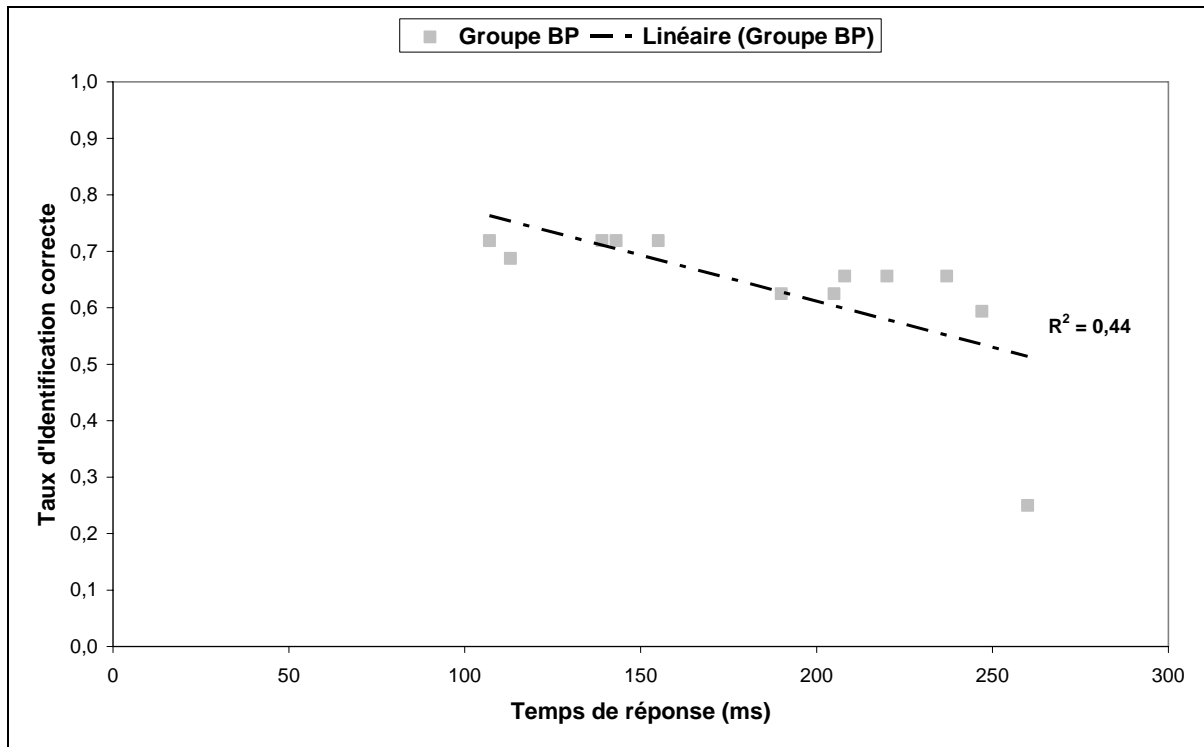


Figure 43 : Corrélation négative entre les performances dans l'Expérience 3 et le temps de réponse dans une tâche lexicale (Courbe de tendance linéaire).

Certains indicateurs portant sur les capacités propres à la lecture corréler également significativement avec les performances d'identification auditive des sujets. Le premier est la vitesse de lecture dans une tâche de lecture de mots hors contexte. La diminution des performances est corrélée négativement à l'augmentation du temps de lecture des sujets ($r = -0.58$, $p < .05$) (Figure 44). Le second indicateur met en évidence un effet de la longueur des mots dans une tâche de lecture de texte mot à mot ($r = -0.63$, $p < .05$) : plus les mots sont longs, plus les performances de lecture diminuent et plus les performances d'identification de l'Expérience 3 diminuent (Figure 45). Le dernier indicateur nous montre un effet de contexte sur les temps de lecture ($r = 0.69$, $p < .05$) : le contexte phrastique dans une tâche de lecture de texte mot à mot perturbent les performances de lecture des sujets BP et est lié également aux performances d'identification dans notre expérience (Figure 46).

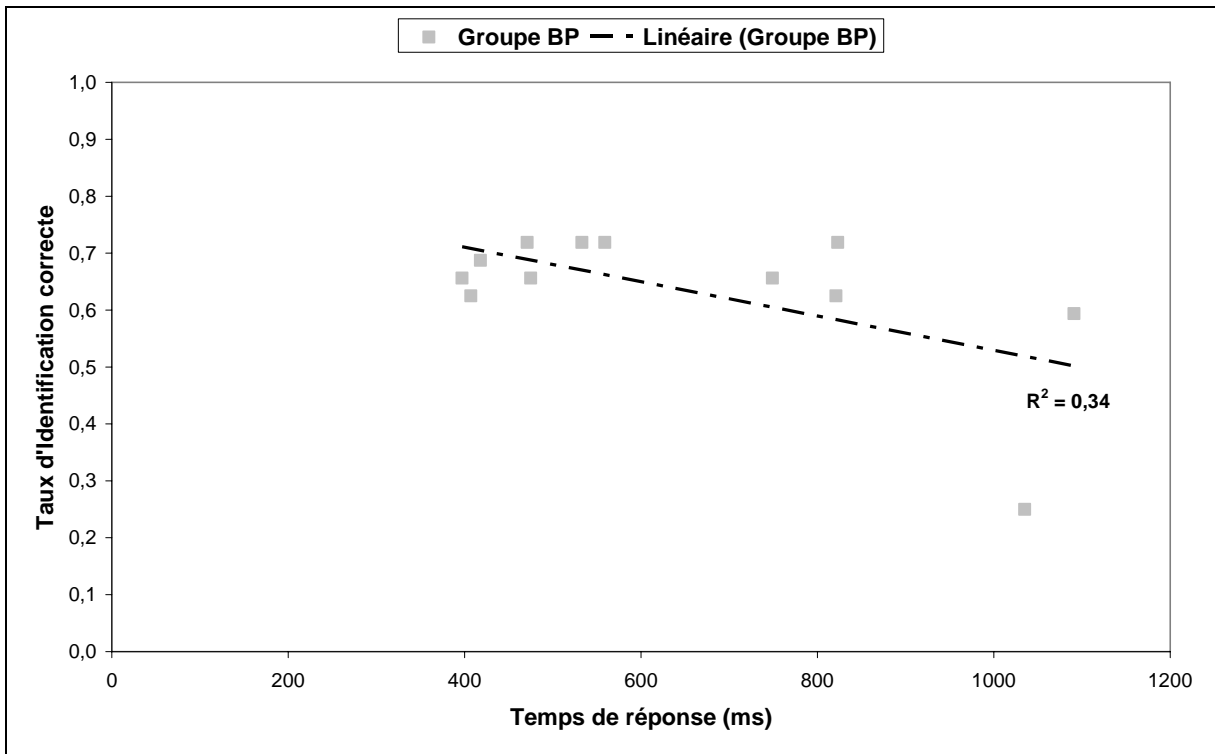


Figure 44 : Corrélation négative entre les performances dans l'Expérience 3 et la vitesse de lecture du groupe BP (Courbe de tendance linéaire).

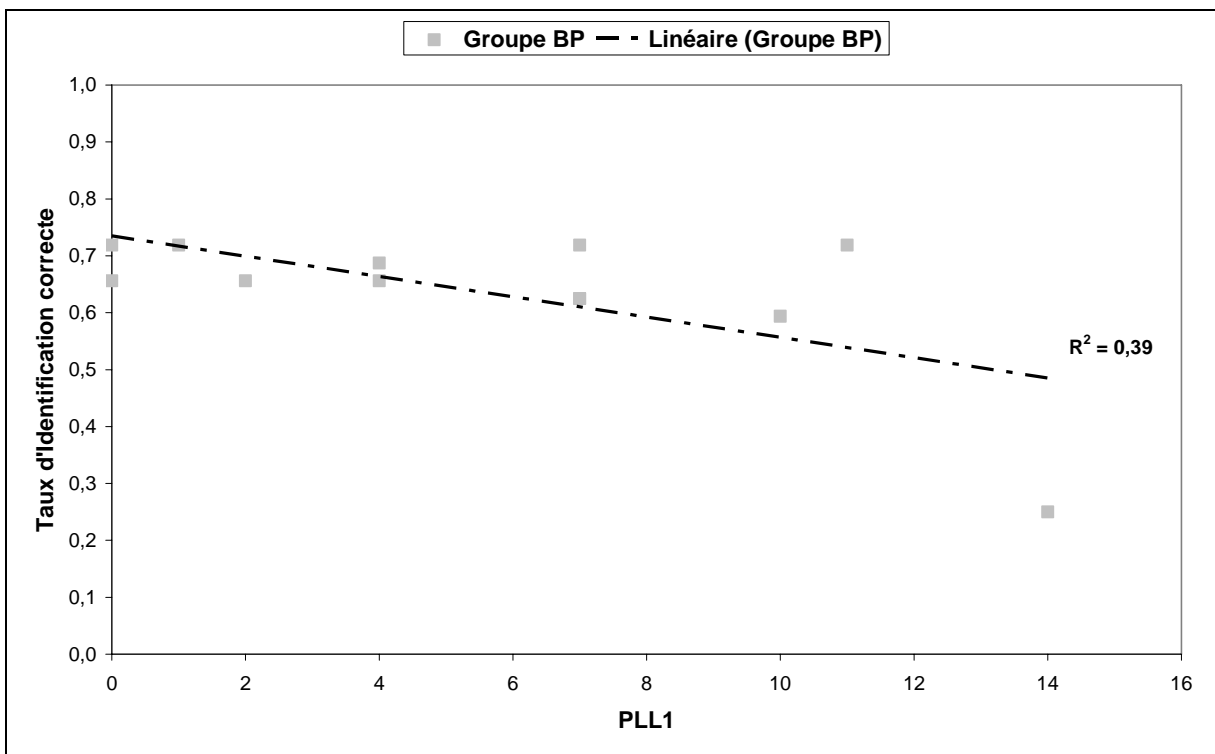


Figure 45 : Corrélation négative entre les performances dans l'Expérience 3 et l'effet de longueur des mots = PLL1 (Courbe de tendance linéaire).

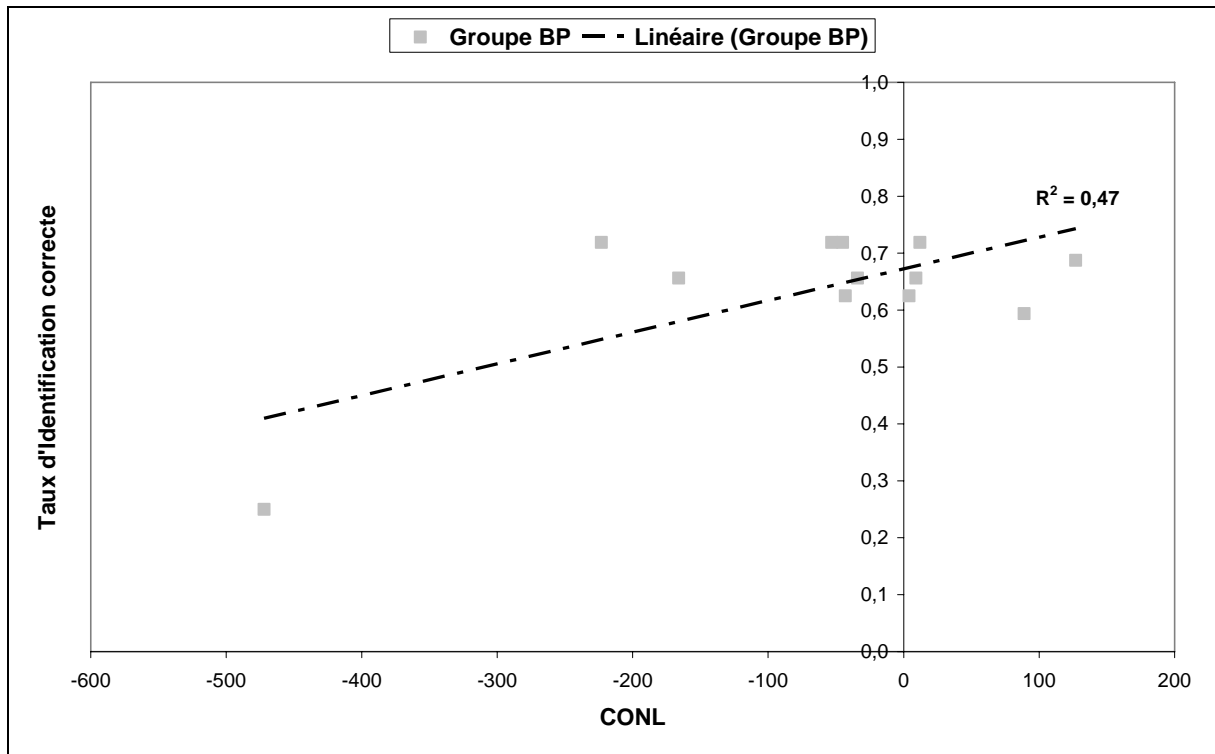


Figure 46 : Corrélation positive entre les performances dans l'Expérience 3 et l'effet de contexte en lecture de texte mot à mot = CONL (Courbe de tendance linéaire).

3.5.3. Discussion

Nous avons observé, dans une première partie (cf. Chapitre 2), les effets de la compression temporelle de deux indices acoustiques brefs (le voisement et les transitions formantiques) sur l'intelligibilité de la parole par des sujets normo-entendants. Nous avons observé une variabilité interindividuelle des performances pour la perception auditive de pseudo-mots plus importante dans la condition de compression à 25% lorsque les deux traits étaient manipulés simultanément (Expérience 3). Cette variabilité pourrait s'expliquer par l'utilisation de stratégies différentes par les participants pour rappeler le pseudo-mot dégradé. Nous avons émis l'hypothèse que cette variabilité pourrait être liée à un déficit auditif et/ou à un trouble d'apprentissage de la lecture comme Tallal (1980a) l'a observé chez des enfants ayant des troubles du langage (Specific Language Impairment, SLI). Parmi les sujets ayant participé à l'Expérience 3 du Chapitre 2, nous avons distingué deux groupes : un groupe de personnes avec de hautes performances (HP), allant de 78% à 97% d'identification correcte des pseudo-mots et un groupe avec de basses performances (BP), allant de 25% à 72% de réponses justes. Pour tenter de comprendre et de circonscrire cette variabilité, nous avons évalué, d'une part, la perception auditive et d'autre part, les capacités de lecture des deux groupes. Les deux groupes ont été testés pour leur audition (audiogramme) et pour leur lecture (test ECCLA).

3.5.3.1. Les corrélats auditifs

Les résultats des tests audiométriques rendent compte d'une bonne audition de l'ensemble des sujets même si nous avons observé une augmentation des seuils auditifs pour les hautes fréquences, à partir de 4000 Hz pour les deux groupes. Cette perte auditive dans les hautes fréquences pourrait refléter le phénomène de la perte auditive induite par le bruit observé chez les 20-30 ans (Gelfand, 2001) p. 202). En effet, le premier indice des effets du bruit sur notre système auditif est une perte des fréquences aigues autour de 4000 Hz.

Par ailleurs, nous avons remarqué des différences significatives entre les deux groupes également dans les hautes fréquences. Le groupe BP présente une légère dominance à droite d'une perte auditive aux hautes fréquences (à 4000 et 6000 Hz). Cette asymétrie à droite, même si elle semble faible, pourrait cependant affecter les performances auditives d'identification des pseudo-mots chez le groupe BP. En effet, comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1, les voies auditives afférentes se croisent au niveau de l'olive supérieure, les informations auditives captées par l'oreille droite vont donc être projetées majoritairement sur les aires auditives primaires du cortex gauche (Rosenzweig, 1951). Les aires du langage se

trouvent également principalement dans l'hémisphère gauche. Un mauvais encodage des hautes fréquences par le système auditif périphérique, au niveau de l'oreille interne droite, pourraient donc se répercuter sur le traitement phonologique des stimuli de langage (pour une revue voir (Démonet, Thierry, & Cardebat, 2005)). De plus, comme nous l'avons vu dans la discussion générale du chapitre précédent, il apparaît qu'au niveau physiologique, les fréquences présentent une différence qualitative d'encodage. Le système auditif est plus sensible à de petits changements de fréquence aux basses fréquences de la zone audible. La résolution fréquentielle est meilleure dans les basses fréquences que dans les hautes fréquences. Cette meilleure résolution fréquentielle aux basses fréquences est corrélée au niveau physiologique à l'anatomie de la membrane basilaire qui privilégie l'encodage des basses fréquences. Les sons les mieux perçus se situent entre 125 et 3000 Hz. Par conséquent, les hautes fréquences sont moins bien perçues donc si une perte auditive se rajoute, il est concevable que l'identification des stimuli de parole soit perturbée dans les fréquences autour de 4000 Hz (fréquences conversationnelles du langage : de 200 à 4000 Hz). Au niveau acoustique, la bande de fréquence des consonnes se situe entre 500 et 8000 Hz alors que celle d'une voyelle est entre 250 à 3000 Hz (Johnson, 1997). Par conséquent, il serait plus difficile de percevoir certains sons consonantiques, comme les fricatives qui ont des valeurs de fréquence au dessus de 4000 Hz. Mais, dans notre étude, nous n'avons pas utilisé de fricatives et les occlusives ont des fréquences inférieures à 3000 Hz. Par conséquent, les pertes auditives sur les hautes fréquences du groupe BP ne peuvent pas être liées à la baisse des performances d'identification auditive des occlusives dans l'Expérience 3. Une origine endocochléaire d'un dysfonctionnement auditif causant les difficultés de perception de la parole est alors écartée, cependant, il est possible d'émettre une hypothèse sur un trouble rétrocochléaire chez les participants qui présentent des difficultés d'identification des pseudo-mots. Il est important de remarquer que le test d'audiométrie tonale effectué chez nos participants n'est pas suffisant pour conclure sur un corrélat auditif lié aux mauvaises performances d'identification de pseudo-mots de notre groupe BP. Des études explorant le système auditif rétrocochléaire, de manière plus approfondie, seraient pertinentes. Une étude comparative du fonctionnement des voies auditives descendantes, entre des adultes dyslexiques et des témoins, fera l'objet du Chapitre 5.

3.5.3.2. Les corrélats phonologiques

Les résultats du test d'évaluation des capacités de lecture nous conduisent à de multiples discussions. Tout d'abord, suite aux analyses statistiques, nous avons observé des effets de

prononçabilité et de longueur des pseudo-mots sur les temps de réponse des sujets. Une suite de lettres non prononçable est très rapidement traitée par le groupe HP alors qu'aucune différence entre les groupes n'est observée quand les suites de lettres sont prononçables. Nous suggérons que le groupe BP aurait des difficultés à traiter des suites de lettres qui ne suivent pas les règles phonotactiques de leur langue. Des suites de lettres non prononçables ne suivent pas ces règles d'enchaînement et de combinaison, le groupe BP serait plus perturbé par ces enchaînements ce qui pourrait rendre compte d'un déficit de segmentation en graphèmes nécessaire pour répondre à la tâche. Puis, au niveau descriptif, nous avons observé un déficit du codage de la position des lettres dans le groupe BP. Ce traitement a lieu lors de l'analyse des chaînes de caractères dans l'étape visuelle. De même, un effet de longueur des mots a été observé : plus les mots sont longs, plus les temps de réponse sont longs. Cet effet indique que les non-mots de deux syllabes sont traités plus lentement par le groupe BP. Ce traitement rend compte des transformations des codes graphémiques en codes phonologiques dans l'étape phonologique. Pris ensemble, ces résultats permettent de suggérer que les difficultés du groupe BP pourraient être liées à un mauvais encodage des codes graphémiques et donc une mauvaise représentation des formes graphiques des lettres. Cette représentation graphémique entre en jeu, en lecture, principalement, dans la voie phonologique de reconnaissance des mots, lors de l'étape de conversion des graphèmes en phonèmes. La voie phonologique permet de traiter les mots rares ou les pseudo-mots comme ceux utilisés dans notre expérience de compression temporelle (Modèle de la double voie, (Coltheart, 1978)). Nous suggérons que dans cette voie, la représentation graphémique des participants BP, soit perturbée. Une mauvaise représentation graphémique conduit à des difficultés d'appariement des unités graphémiques avec les unités phonologiques (temps de réponse plus longs). Par conséquent, l'activation du lexique par le biais des codes phonologiques ou directement par les codes graphémiques est moins efficace et la reconnaissance des mots est ainsi altérée. Cette explication pourrait rendre compte des basses performances de reconnaissance auditive des pseudo-mots de notre groupe BP. La compression temporelle affecte les indices acoustiques du signal conduisant à un traitement et un encodage encore plus problématique du signal pour le groupe BP.

3.5.3.3. Les corrélations

Ensuite, lors de l'analyse des corrélations, nous avons observé que les deux groupes n'évoluaient pas dans le même sens selon les étapes de traitement. Il apparaît que le groupe HP soit composé de très bons lecteurs alors que le groupe BP regroupe des sujets ayant des

problèmes dans la reconnaissance des mots. Les résultats des corrélations permettent d'appuyer l'hypothèse émise précédemment sur les déficits cognitifs des sujets BP.

Pour le groupe HP, les bonnes performances à l'Expérience 3 covarient avec de bonnes capacités de lecture. Les participants du groupe HP ont une lecture rapide.

En ce qui concerne la lecture du groupe BP, nous avons pu voir que leurs moins bonnes performances à l'Expérience 3 étaient liées à une vitesse de lecture plus lente, à un effet de la longueur des mots qui peut les ralentir dans leur lecture et à un effet du contexte qui les ralentit également. Leur lecture est donc plus lente que le groupe HP. D'autres paramètres, en dehors des mesures concernant la lecture, ont été corrélés aux performances du groupe BP. Nous avons pu mettre en évidence une corrélation dans les trois étapes de la lecture : visuelle, phonologique et lexicale. Les trois corrélations montrent un ralentissement des temps de réponse pour les sujets BP dans les trois tâches visuelle, phonologique et lexicale. Leurs performances dans l'Expérience 3 sont corrélées à une augmentation du temps de réponse. Nous pouvons donc suggérer que le déficit à la base des voies phonologique et orthographique se répercute tout le long de ces voies. Nous avons montré, chez les sujets BP, que l'activation des chaînes de caractères et de codage de la position des lettres était déficiente dans l'étape visuelle. De même, nous avons mis en évidence des difficultés dans la transformation des codes graphémiques en codes phonologiques, ainsi que dans l'accès au lexique, c'est-à-dire lors de l'appariement du pattern graphémique avec une entrée du lexique mental du sujet.

3.5.3.4. Conclusion

La Figure 47 schématise les différentes étapes qui rendent compte des corrélations phonologiques que nous avons mises en évidence dans cette étude entre la variabilité interindividuelle des performances d'identification des pseudo-mots et les capacités de lecture. De faibles performances d'identification des pseudo-mots, dans notre expérience, sont liées à des difficultés en lecture. Nous avons suggéré que ces troubles de lecture se situeraient à un niveau phonologique, lors de l'étape de conversion graphème-phonème. Nous supposons que ces problèmes phonologiques affecteraient également des stratégies de compensation de la parole compressée. Les informations altérées lors de la compression temporelle des indices acoustiques sont, dans certaines limites, remplacées par d'autres informations présentes dans les autres indices restés intacts. Ce phénomène de redondance fait appel à des mécanismes

cognitifs dont le fonctionnement peut être perturbé si les représentations phonologiques sont défaillantes.

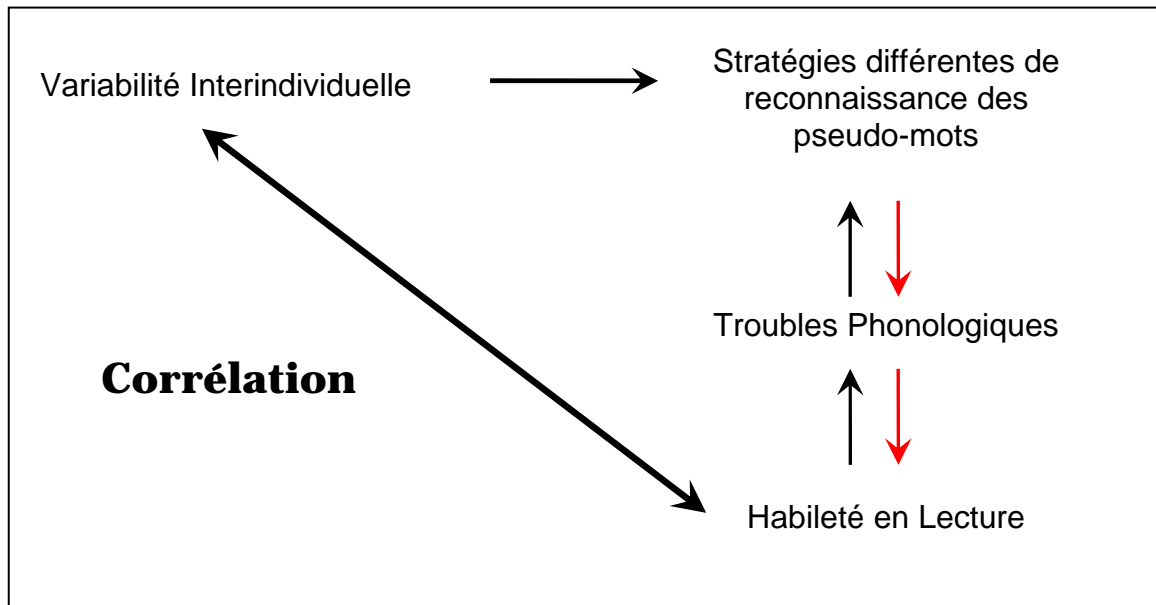


Figure 47 : Résumé des différents processus et phénomènes pouvant expliquer la variabilité interindividuelle rencontrée dans l'Expérience 3.

Pour résumer, il semblerait que certaines étapes cognitives utilisées lors de la lecture soient déficientes chez les personnes qui ont des difficultés à identifier correctement de la parole compressée, notamment lorsque l'indice de voisement et celui de lieu d'articulation des occlusives sont manipulés. Des déficits similaires, lors du traitement temporel du signal de parole, ont été également décrit par Tallal (1980a). Cette étude de Tallal montre que des enfants avec des troubles d'apprentissage du langage (SLI) présentent des déficits de perception auditive des sons de parole. Plus précisément, les segments acoustiques rapides et brefs sont moins bien perçus par ces enfants ayant des problèmes de langage. La théorie du déficit auditif de traitement temporel postule que l'extraction et l'intégration des segments de parole rapides et transitoires sont défaillantes. Ce trouble conduirait, par conséquent, à un mauvais apprentissage du système des correspondances grapho-phonémiques. Notre groupe BP présente les mêmes déficits : les appariements entre les graphèmes et les phonèmes sont défaillants ce qui conduit à des troubles phonologiques. Les dyslexiques présentent des difficultés importantes dans des tâches métaphonologiques qui consistent à segmenter les mots en sous-unités phonémiques et qui supposent d'avoir une conscience phonémique. Wagner & Torgesen (1987) postulent qu'il existerait un rôle causal de la conscience phonologique sur l'acquisition des capacités de lecture. Comme les dyslexiques, nos participants du groupe BP présentent des difficultés en lecture qui sont corrélées à leur

performance de reconnaissance auditive de pseudo-mots. En aucun cas nous ne considérons que notre groupe BP soit composé d'individus dyslexiques mais nous pouvons rapprocher le retard de lecture du groupe BP aux difficultés de lecture des dyslexiques et nous demander comment le dyslexique se comporterait dans une tâche de reconnaissance de pseudo-mots compressés temporellement sur des indices acoustiques rapides et brefs : le voisement et le lieu d'articulation. De nombreuses études soutiennent l'idée que des enfants ayant des troubles de l'apprentissage de la lecture se caractérisent par une incapacité à traiter l'information temporelle auditive (Tallal & Stark, 1981). Cette question fera l'objet de l'étude du Chapitre 4.

Chapitre 4

La dyslexie ou un déficit du traitement temporel du signal de la parole

« Je ne parlerai pas de notre orthographe, malheureusement fixée, en toute ignorance et absurdité, par les pédants du XVIIe siècle et qui n'a cessé depuis lors de désespérer l'étranger et de vicier la prononciation de nos mots. Sa bizarrerie en a fait un moyen d'épreuve sociale : celui qui écrit comme il prononce est, en France, considéré inférieur à celui qui écrit comme on ne se prononce pas. »

Paul Valéry

« L'orthographe est une science qui consiste à écrire les mots d'après l'œil et non d'après l'oreille. »

Ambrose Bierce

Suite aux résultats du Chapitre 3, qui ont montré une corrélation entre les capacités de lecture et les performances d'identification de la parole compressée (les mauvais lecteurs avaient des performances plus basses que les lecteurs experts), nous avons décidé de nous intéresser à la dyslexie qui correspond à un trouble d'apprentissage de la lecture. Notre objectif est de tester si la compression temporelle produit des effets accentués chez des lecteurs adultes atteints d'une dyslexie développementale. Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord la dyslexie développementale et ses différentes théories explicatives. Puis, nous aborderons les corrélats neuroanatomiques de la dyslexie développementale. Enfin, les Expériences 1 et 2 (cf. Chapitre 2) seront menées sur une population d'adultes dyslexiques et de lecteurs experts. Une discussion, sur les différences de performances en reconnaissance auditive de pseudo-mots observées entre les deux groupes, clôturera ce chapitre.

4.1. Introduction

En 1896, Pringle Morgan (1896) publia le premier cas de dyslexie en Angleterre : un jeune garçon de 14 ans qui, malgré une intelligence normale, était incapable d'apprendre à lire. En France, le neurologue Déjerine (1892) utilisait le terme de « cécité verbale » pour expliquer les difficultés de lecture chez l'adulte après une lésion cérébrale. Actuellement, nous parlons de dyslexie acquise dans le cas d'une lésion cérébrale entraînant des troubles de lecture et de dyslexie développementale lorsque les difficultés de lecture surviennent lors de l'apprentissage. Ces découvertes font suite aux études sur les troubles du langage, dont les plus célèbres sont celles de Broca en France (1865) et de Wernicke en Allemagne (1874). Ces travaux précurseurs ont servi à démontrer qu'il existait des aires cérébrales spécifiques au traitement de la parole dans l'hémisphère gauche du cerveau humain. Puis, au milieu du XX^e siècle, les études se sont concentrées aux États-Unis puis dans les pays scandinaves (notamment le Danemark) où les recherches étaient très actives. L'émergence de la psychologie cognitive et des neurosciences, dans les années 1970, a redonné un second souffle aux recherches sur la dyslexie. Plus précisément, les travaux pionniers d'Isabelle Liberman (laboratoire Haskins aux États-Unis) ont permis d'élargir les connaissances sur le rapport entre la lecture compétente et la dyslexie. Non seulement, la lecture est une activité visuelle (les dyslexiques confondent les lettres proches visuellement) comme le soutient Orton (1937), mais elle repose également sur une activité langagière impliquant une relation entre l'écrit et le langage oral. De plus, les travaux américains en neurosciences de Geschwind et Galaburda ont mis en évidence des différences anatomiques cérébrales spécifiques chez les dyslexiques. Pendant ce temps, en France, les recherches sur la dyslexie ont été peu nombreuses à cause des débats entre les défenseurs de la dyslexie définie comme un trouble de la personnalité et les opposants à l'existence même de la dyslexie. L'évolution des idées, en ce qui concerne les troubles du langage, permet aujourd'hui de reconnaître la dyslexie comme étant due à un dysfonctionnement cognitif susceptible de générer un handicap. En retour, nous assistons à l'émergence de nombreuses recherches appliquées visant à enrichir le diagnostic et proposant des techniques de rééducation efficaces.

La reconnaissance d'un lien étroit entre les aspects visuels et la phonologie en lecture a permis le développement de recherches mettant en évidence un codage phonologique automatique et obligatoire dans la lecture silencieuse. Van Orden (1987) met en évidence une activation des représentations phonologiques automatiques et non-stratégiques par les

individus. Une tâche de catégorisation sémantique est proposée aux sujets : ils doivent décider si un mot cible (ROWS homophone de ROSE ou ROBS proche orthographiquement de ROSE) appartient à la catégorie A FLOWER (une fleur). Les participants font plus d'erreurs positives avec ROWS (ROWS est une fleur) qu'avec ROBS. Par conséquent, l'effet d'homophonie observé appuie l'hypothèse d'une médiation phonologique. La présentation du mot cible va activer le code orthographique qui va lui-même activer le code phonologique, permettant l'accès au lexique, mais l'identification est erronée. Les auteurs montrent également que les informations phonologiques et orthographiques influencent conjointement et simultanément la lecture silencieuse des mots et que la médiation phonologique est précoce et rapide. Dans une tâche de détection de lettres pour laquelle le codage orthographique serait suffisant pour identifier le mot, sans l'utilisation du codage phonologique, Ziegler, Van Orden et Jacobs (1997) mettent en évidence une activation des codes phonologiques qui dépend du lecteur de manière automatique et obligatoire. De même, Berent et Perfetti (1995) postulent que la facilitation observée en amorçage masqué est due à une activation précoce, automatique et prélexicale de l'information phonologique. La phonologie joue donc un rôle primordial dans la lecture. L'établissement des correspondances entre graphèmes et phonèmes est une étape critique lors de l'apprentissage de la lecture. Les connaissances des structures phonologiques des enfants permettent de prédire précocement leurs futures habiletés en lecture (Bertelson, Morais, Alegria, & Content, 1985). Les difficultés d'apprentissage de la lecture chez les dyslexiques peuvent être liées à un trouble phonologique, ils manipulent difficilement les phonèmes et ont des difficultés à faire ou à détecter des rimes. Nous reviendrons en détail sur ce déficit phonologique chez les dyslexiques dits phonologiques en opposition aux dyslexiques non phonologiques.

Dans cette partie théorique, nous définirons la dyslexie et nous décrirons les principaux troubles qui lui sont liés. Nous ferons une revue de différentes études portant sur l'étiologie de la dyslexie et terminerons par une discussion des différentes théories actuelles de la dyslexie. La partie expérimentale présentera notre étude visant à tester la pertinence et la puissance de l'hypothèse d'un déficit auditif du traitement temporel dans la dyslexie.

4.2. La dyslexie développementale

4.2.1. La définition

La dyslexie est un trouble des apprentissages et plus précisément, un trouble spécifique et durable de la lecture. Les critères permettant d'identifier le trouble spécifique de la lecture

(communément connu sous l'appellation dyslexie développementale) sont établis par l'Association Américaine de Psychiatrie et sont publiés dans le manuel diagnostique DSM-IV-TR (2004). Les critères sont : un écart significatif (d'au moins 18 mois) entre le rendement intellectuel et les compétences en lecture (précision et/ou rapidité) qui interfère de façon significative avec la réussite académique et les activités de la vie quotidienne qui nécessitent de lire. Ce trouble spécifique de la lecture ne peut s'expliquer par une déficience intellectuelle, un trouble psychoaffectif, un déficit sensoriel (vision et audition), un manque d'opportunité éducative ou un manque de motivation et d'intérêt.

La définition de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) dans sa Classification Internationale des Maladies (CIM 10, 1993) est la suivante : « La dyslexie (du grec lexis = mot) est un trouble spécifique, durable et persistant de l'acquisition du langage écrit apparaissant chez un enfant d'intelligence normale (évaluée par des épreuves non verbales), dans un environnement scolaire adéquat, et ne présentant par ailleurs aucun trouble sensoriel, émotionnel, ni déficit socioculturel majeur. ». La dyslexie est le trouble développemental d'origine neurologique le plus fréquent touchant environ 10 % de la population générale quel que soit le pays, la culture et le type de langue selon un rapport de l'OMS (voir aussi Habib, 2000 ; Shaywitz, 1998). La définition inclut tous les enfants ayant une intelligence normale (mesure du quotient intellectuel, $QI > 70$) et évoluant dans un environnement scolaire adéquat, mais ayant des capacités de lecture significativement inférieures à la moyenne des enfants de même âge (au moins 18 mois de retard). Cette définition de l'OMS regroupe également tous les adultes ayant présenté ces problèmes pendant leur enfance ainsi que ceux présentant des capacités en orthographe significativement inférieures à la moyenne des adultes.

La dyslexie est également définie comme un problème d'apprentissage de la lecture en absence de déficit sensoriel (vue, ouïe) ou neurologique, de déficit intellectuel, de troubles du comportement, de troubles de la personnalité, d'inéquation générale à la scolarité pouvant expliquer l'inaptitude à la lecture (Shaywitz, 1998). La dyslexie est, jusqu'à présent, un trouble qui persiste toute la vie et qui ne connaît aucun traitement capable de l'éliminer entièrement. Le dysfonctionnement cognitif est donc présent tout au long de la scolarité de l'enfant dyslexique et persiste à l'âge adulte. Cependant, des études montrent que pour certains types de dyslexies, des techniques de rééducation peuvent être efficaces si elles sont bien adaptées et suivies avec rigueur.

4.2.2. Le retard de lecture

Il est important de ne pas confondre la dyslexie et l'échec scolaire. Il faut différencier les enfants faibles lecteurs des enfants dyslexiques. Les enfants faibles lecteurs présentent un retard simple de lecture. Leurs difficultés d'apprentissage de la lecture ne persistent pas et la cause multifactorielle est la plupart du temps due principalement à l'environnement (familial, scolaire). Une approche pédagogique adaptée suffira pour remédier à un tel retard d'apprentissage de la lecture.

4.2.3. Le trouble spécifique du langage

Une distinction existe également entre la dyslexie et le trouble spécifique du langage (SLI, Specific Language Impairment). Les enfants SLI ont des troubles morphosyntaxiques, des difficultés à trouver les mots et un déficit en compréhension de la parole (Leonard, 1998). Les enfants SLI sont déficients au niveau de l'acquisition du langage, ceci en absence de trouble neurologique, physique ou intellectuel. La dyslexie et le SLI ont donc des symptômes très proches. Une composante génétique serait impliquée dans le SLI, tout comme dans la dyslexie. Cependant, les SLI présentent plus de problèmes en dehors de la lecture et les dyslexiques ont des difficultés plus spécifiques à l'alphabétisation (de Bree, Wilsenach, Gerrits, & Wijnen, 2003). Pour certains auteurs, la dyslexie et le SLI se distingueraient donc par leur degré de sévérité. Les enfants dyslexiques seraient atteints de troubles moins sévères que les enfants SLI. Par exemple, Tallal, Allard, Miller et Curtiss (1997) disent que la dyslexie correspondrait à une forme légère de SLI. Mais cette hypothèse reste encore largement débattue (Snowling, 2001 ; Snowling, Bishop, & Stothard, 2000).

4.2.4. Le diagnostic de la dyslexie développementale

Le diagnostic de dyslexie développementale ne peut être posé qu'au moins après 18 mois d'apprentissage de la lecture. Plus tôt le diagnostic sera établi, plus vite des méthodes de rééducation pourront être mises en place afin de pallier les déficits. De plus, une recherche d'antécédents familiaux de dyslexie est un point important sachant que le caractère héréditaire de la dyslexie a été largement reconnu.

Avant ce diagnostic, d'autres indices peuvent être pertinents. Dès la grande section de maternelle ou le CP, un dépistage de troubles spécifiques comme de faibles capacités de conscience phonologique, l'existence de troubles de langage oral, de la mémoire verbale, de dénomination des lettres, sont des facteurs d'alerte qui doivent éveiller l'attention de

l'entourage. Les signes précurseurs dans les classes de maternelle sont, principalement, des confusions entre les différents phonèmes (p. ex. /p/-/b/, /t/-/d/), des omissions, des substitutions, des inversions ou des ajouts de mots ou de segment de mots. En parole spontanée, le point le plus important est une incapacité à repérer ou à faire des rimes à l'âge de 4 ans. Les habiletés phonologiques des enfants est un bon prédicteur des capacités futures en lecture. Les compétences phonologiques et la lecture entretiennent des relations bidirectionnelles (Bradley & Bryant, 1983 ; Lecocq, 1991 ; Wagner & Torgesen, 1987) cependant, la nature des liens qui les unissent restent encore obscures. Les habiletés phonologiques mettent en jeu la conscience phonémique qui se définit comme la conscience que les mots parlés sont constitués de petites unités phonologiques abstraites, discrètes et manipulables, en l'occurrence les phonèmes.

Une distinction est opérée dans les habiletés phonologiques quant au fait que les processus cognitifs impliqués sont conscients ou non. Gombert (1990) explique que la notion d'épiphonologie renvoie au fait que les unités phonologiques traitées ne sont pas directement disponibles et manipulables. Par exemple, dans une tâche où il est demandé de trouver un mot qui rime avec le mot cible, ce sont les capacités épiphonologiques qui sont mises en jeu. Les capacités métaphonologiques, quant à elles, renvoient à une prise de conscience explicite des unités traitées (Gombert & Colé, 2000). Par exemple, les capacités métaphonologiques sont évaluées dans une épreuve où l'enfant doit supprimer la consonne initiale d'un mot et prononcer ce qui reste du mot. Ecalle et Magnan (2002) postulent que le traitement épiphonologique précéderait et faciliterait le traitement métaphonologique. Une étude longitudinale sur 36 enfants entre la grande section de maternelle (GS) et le CP proposait d'étudier la mise en place des habiletés phonologiques au moment de l'apprentissage de la lecture et de l'écrit. Les résultats montrent un effet du traitement, le traitement épiphonologique révèle de meilleures performances que le traitement métaphonologique mais la différence entre les deux tend à diminuer au CP. Il semblerait donc que le passage de l'implicite à l'explicite se fasse grâce à l'entraînement en milieu scolaire (J. Ecalle & A. Magnan, 2002). Une rééducation précoce pourrait donc être bénéfique afin de stimuler les capacités phonologiques et verbales d'enfants à risques dans l'acquisition de la lecture. Un suivi orthophonique et un encadrement familial, dès l'enfance, semblent deux conditions importantes pour observer une évolution positive de la dyslexie à l'âge adulte.

4.2.5. Les grandes formes de dyslexie développementale

Les dyslexiques ont des difficultés spécifiques, durables et significatives, à déchiffrer et à reconnaître des mots, à lire couramment et à comprendre ce qui est lu. Cette inaptitude à la lecture relève de différents facteurs comme une conscience phonologique insuffisante, des difficultés de conversion des graphèmes en phonèmes, des difficultés de fusion des phonèmes en syllabes, des difficultés d'association des syllabes en mots, des difficultés d'accès au sens ou bien des difficultés de fixation visuelle. Certains enfants ont, en effet, des troubles visuo-spatiaux c'est-à-dire qu'ils vont avoir tendance à confondre la gauche et la droite, dessus et dessous, avant et après, ainsi qu'avec d'autres termes et concepts d'orientation. Des difficultés dans des tâches mnésiques et dans l'accès au lexique sont également mises en évidence chez ces enfants.

Ces différents facteurs ont conduit les chercheurs à tenter de catégoriser les cas de dyslexie selon ces quelques grands types (Castles & Coltheart, 1993 ; Manis, Seidenberg, Doi, McBride-Chang, & Petersen, 1996). Cette typologie de dyslexies développementales est avant tout comportementale et vise à préciser la procédure qui est majoritairement déficitaire, en se basant sur le modèle de la double voie, pour rendre compte des profils d'erreurs du patient en lecture. Il s'agit de préciser si la voie par adressage ou la voie par assemblage est particulièrement déficitaire, sans qu'il soit toujours possible de connaître directement l'origine des difficultés rencontrées. Pour décrire les dysfonctionnements en lecture des dyslexiques, les différents courants théoriques s'appuient sur le modèle de la double voie (Coltheart, 1978 ; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001) . Comme nous l'avons expliqué dans le Chapitre 3, ce modèle est composé de deux voies : une voie lexicale (par adressage) et une voie analytique (par assemblage). La voie lexicale serait perturbée chez les dyslexiques de surface alors que ce serait la voie analytique chez les dyslexiques phonologiques (Figure 48). Chez les dyslexiques mixtes les deux voies sont perturbées (Boder, 1973). Notons que Manis et al. (1996) préfèrent décrire ces deux sous-types de dyslexie selon le modèle connexionniste de Seidenberg et McClelland (1989) (cf. Chapitre 3). À l'inverse du modèle double voie, ce modèle suppose qu'un système unique établit une carte d'activation entre l'orthographe et la phonologie grâce à des connexions variables entre les représentations distribuées des informations lexicales, ce qui permet de lire à la fois les mots et les pseudo-mots, en se basant sur la connaissance des mots. Mais l'utilité de ce classement est encore vivement critiquée pour comprendre les troubles sous-jacents de la dyslexie. Au niveau comportemental, d'une part, nous n'avons pas d'outils assez puissants permettant de

distinguer précisément les différents types de dyslexie et d'autre part, la plupart des patients ont une dyslexie mixte à prédominante phonologique (Sprengr-Charolles, Colé, Lacert, & Serniclaes, 2000).

La dyslexie phonologique (dysphonétique) est la plus fréquente et serait déterminée par des troubles phonologiques qui empêcheraient l'acquisition des correspondances graphèmes-phonèmes indispensable à la lecture. La voie phonologique est déficitaire alors que la voie lexicale est préservée. De ce fait, l'enfant peut lire et écrire les mots les plus familiers (réguliers et irréguliers) mais ne lit et n'écrit pas, ou mal, les mots inconnus ou rare (pseudo-mots et nouveaux mots) pour lesquels il se contente alors d'une approximation basée sur la ressemblance visuelle avec des mots connus. En premier lieu, les enfants dyslexiques ont des difficultés à apprendre le nom des lettres de l'alphabet ou les sons correspondants, et à écrire ces lettres dans l'ordre. Ce type de dyslexie se distingue par une méconnaissance des règles de conversion grapho-phonémiques, qui se traduit par des erreurs d'ordonnement avec des inversions, des ajouts, des omissions, des substitutions de graphèmes visuellement proches (b/d - u/n), des confusions entre consonnes sourdes et sonores (p/b - t/d) et des substitutions de mots graphiquement ou sémantiquement proches. Pour lire, de tels enfants ne peuvent recourir qu'à leur capacité à identifier le mot globalement sans en analyser les éléments constitutifs. Cela requiert une importante capacité de mémorisation de l'orthographe spécifique de mots nouveaux, et les faibles capacités de déchiffrage grapho-phonémique empêchent la découverte autonome de l'identité de nouveaux mots écrits. Leur lecture est donc plus lente et leur compréhension de texte plus difficile.

La dyslexie de surface (dyséidétique) se traduit par un accès perturbé au sens : la voie lexicale est déficitaire alors que la voie phonologique est préservée. Les signes de ce type de dyslexie sont : un bon déchiffrage de mots réguliers et de pseudo-mots (utilisation des correspondances graphèmes-phonèmes), un faible lexique de mots reconnus de manière automatique et une incapacité à lire les mots irréguliers (régularisation). Les difficultés en épellation portent principalement sur des mots qui se mémorisent de façon globale (mots fréquents mais irréguliers) comme *est*, *sont* ou *dans*, et ce, en dépit d'un entraînement intensif. Les erreurs d'épellation consistent, majoritairement, en des inversions et lorsque ce sont des mots copiés directement d'un livre ou d'un tableau. Miles (1993) observe que les difficultés d'épellation continuent à l'âge adulte. La lecture est très coûteuse en effort cognitif puisqu'elle repose entièrement sur un déchiffrage séquentiel grapho-phonémique systématique. L'attention est entièrement consacrée au décodage. Le rythme de lecture est donc très lent et

les problèmes de compréhension sont majeurs (Coltheart, Masterson, Byng, Prior, & Riddoch, 1983).

Ces deux types de dyslexie représentent des extrêmes. Dans les faits, les manifestations des troubles lexiques sont souvent plus confuses et moins tranchées. Les dyslexiques mixtes présentent un dysfonctionnement des deux voies. Les différents types d'erreurs observés dans la dyslexie phonologique et la dyslexie de surface se retrouvent dans la dyslexie mixte, en lecture et en écriture de mots et de pseudo-mots. Deux explications à la dyslexie mixte sont actuellement en pour parler. La première consiste à penser que les dyslexiques mixtes présentent un trouble essentiellement phonologique qui, lors de l'apprentissage de la lecture, empêche l'utilisation correcte de la voie par assemblage. Le problème majeur qui en découle est que le lexique orthographique va être moins riche d'où un type de dyslexie qui se définit comme un trouble à la fois de l'assemblage et de l'adressage. La seconde explication postule que l'enfant présente de fortes difficultés visuo-attentionnelles, mais sans trouble phonologique, ce qui peut rendre difficile l'adressage lexical car il nécessite un encodage précis de la position des lettres mais également l'application de règles complexes de conversions graphèmes-phonèmes lorsque la prise en compte du contexte est nécessaire (p. ex. /k/ qui peut être prononcé [s] ou [k] selon le contexte). Les erreurs témoigneront de difficultés à la fois en adressage et en assemblage. En conclusion, le plus important et le plus pertinent est donc de savoir si l'enfant présente un trouble phonologique ou visuo-attentionnel à la base.

De plus, Joanisse, Manis, Keating et Seidenberg (2000) montrent une très grande variabilité des déficits cognitifs entre les dyslexiques relevant d'un même type (phonologique, de surface ou mixte). Il n'existe pas de preuve formelle attestant qu'il existe seulement deux troubles dont l'origine serait fondamentalement distincte. À l'heure actuelle, il est plus prudent de considérer ces variations comme des manifestations différentes des troubles sans invoquer ni de rupture qualitative dans les manifestations des troubles ni d'origine distincte pour ces "types". Pour résumer, comme nous l'avons dit précédemment, une meilleure connaissance des déficits cognitifs responsables des difficultés des dyslexiques semble donc un point essentiel.

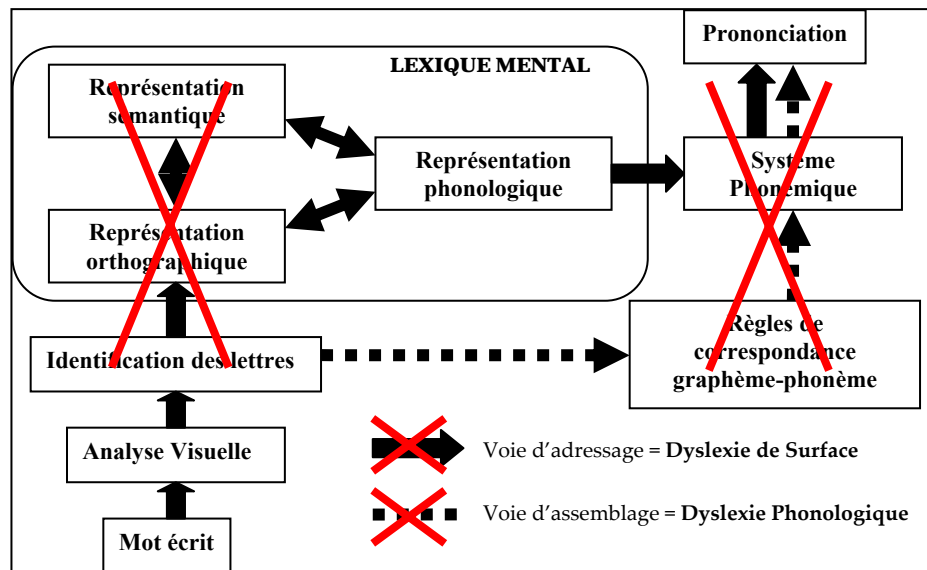


Figure 48 : Les atteintes du modèle de la double voie chez les dyslexiques (Coltheart, 1978).

4.2.6. La dyslexie développementale chez l'adulte

La dyslexie comme nous l'avons définie est un trouble durable de la lecture qui persiste à l'adolescence et à l'âge adulte (Pennington, van Orden, Smith, Green, & Haith, 1990 ; Scarborough, 1984). Rack (1997) renforce cette notion de « dyslexie à long terme », en évaluant les capacités cognitives d'adultes dyslexiques, ce qui lui a permis de mettre en évidence diverses difficultés qui se répartissent en différents sous-groupes. Il a observé des déficits phonologiques, des problèmes de mémoire, des troubles de la coordination visuo-motrice mais également des troubles du langage chez certains dyslexiques. Cette variabilité dans les difficultés reflète de véritables troubles qui nécessitent l'établissement d'un profil neuropsychologique comme chez les enfants (Elbro, Nielsen, & Petersen, 1994 ; Felton, Naylor, & Wood, 1990). Cependant, chez l'adulte, le diagnostic est plus compliqué du fait notamment de l'absence de tests de lecture et d'écriture adaptés et standardisés (le *Nelson-Denny Reading Test* est une exception en anglais, (Brown, Fishco, & Hanna, 1993) mais également des capacités de compensation acquises tout au long de sa vie, par exemple lors d'une prise en charge orthophonique. De plus, le dyslexique adulte a une plus grande expérience de la lecture ou tout du moins de l'écrit, ce qui peut masquer des difficultés sous-jacentes à la pathologie. Le moyen diagnostique le plus juste et le plus sensible est probablement « l'histoire » du patient adulte, son anamnèse, du fait du manque d'efficacité des outils diagnostiques existants. Un diagnostic peut donc être établi à l'âge adulte qui rendra compte des troubles présents au moment de l'enfance.

Longtemps, la dyslexie chez l'adulte a été étudiée suite à des lésions cérébrales qui touchaient les zones cérébrales impliquées dans la lecture, on parle alors de dyslexie acquise. Peu de travaux ont concerné les cas d'adultes qui ont été des enfants dyslexiques et dont certains symptômes persistent. La plupart du temps, si la lecture a été pratiquée avec assiduité pendant l'enfance, la lecture de l'adulte dyslexique se fait avec une plus grande exactitude mais elle ne devient pas automatique. La lecture reste lente et manque de fluidité ; seul le taux d'erreur se réduit. La lecture demande un effort supplémentaire pour les dyslexiques, l'énergie dépensée est donc plus importante pour aboutir au même objectif qu'un lecteur expert, ce qui peut s'avérer un exercice épuisant et démotivant. Cet effort supplémentaire pour la lecture a même été observé pour les adultes les plus brillants ayant été diagnostiqués dyslexiques durant leur enfance (Lefly & Pennington, 1991). Pour un diagnostic chez l'adulte, le temps de lecture est donc l'aspect le plus informatif, car il rend compte du caractère automatique ou non de la lecture. Ainsi, en anglais, le *Nelson-Denny Reading test* est utilisé chez les jeunes adultes pour rendre compte de leur difficultés de lecture en mesurant les temps de lecture. Shaywitz et al. (1999) présentent une étude longitudinale de l'enfance à l'adolescence chez des dyslexiques du Connecticut. Cette étude a montré que les troubles liés à la dyslexie ne disparaissent pas entièrement à l'adolescence, particulièrement le déficit de conscience phonologique (voir aussi Bruck, 1990 ; Bruck, 1992 ; Felton, Naylor, & Wood, 1990). Les adultes dyslexiques, s'ils ont été suivis depuis l'enfance, utilisent des stratégies compensatoires pour surmonter leur retard de lecture ou leur difficulté en orthographe. Un groupe d'adultes dyslexiques compensés a été comparé à un groupe d'adultes dyslexiques avec de faibles performances en lecture et un groupe contrôle ne présentant pas de déficit de lecture (Shaywitz et al., 2003). Dans cette étude, le groupe de dyslexiques compensés présente un patron d'activations neuronales en partie différent des deux autres groupes ce qui suggère l'activation d'un réseau neuronal spécifique aux mécanismes de compensation. Les auteurs émettent l'hypothèse selon laquelle les dyslexiques dont le déficit est compensé présenteraient des capacités cognitives meilleures leur permettant de remédier à leurs difficultés d'apprentissage. Ces capacités cognitives (p. ex. mémoire visuelle, analyse contextuelle, capacité verbale) présentes dès l'enfance leur permettraient d'engager des stratégies compensatoires à leur déficit phonologique.

Les conséquences psychosociales de la dyslexie peuvent être graves chez certaines personnes. Les travaux de Bruck (1998) montrent que ces personnes atteignent en moyenne un niveau d'étude plus bas, qu'elles sont plus touchées par le chômage et qu'elles ont un niveau de stress plus important, tout cela en dépit de leur niveau intellectuel normal. De plus,

les dyslexiques peuvent souffrir d'une baisse d'amour propre et être démoralisés ce qui complexifie leurs relations sociales. Par conséquent, une prise en charge orthophonique voire psychologique semble appropriée le plus tôt possible.

4.2.7. Les habiletés élémentaires de traitement phonologique et la lecture

De nombreuses études ont porté sur différentes compétences supposées jouer un rôle en lecture (Habib, 1997 ; Lecocq, 1991 ; Ramus et al., 2003). Il s'agit notamment de la rapidité de récupération d'unités lexicales, évaluée par des tâches de dénomination rapide d'objets (mots ou chiffres), mais surtout de performances dans le domaine de la manipulation d'unités phonologiques infra-lexicales (suppression, inversion, extraction de syllabes ou de phonèmes) ainsi que la détection d'intrus phonologiques et le jugement de similarité phonologique sur les rimes et les attaques. Les capacités de segmentation du signal de parole et d'analyse segmentale sont un très bon prédicateur d'éventuelles difficultés dans l'apprentissage de la lecture (Lecocq, 1993), tout comme les difficultés de discrimination visuelle. On ne peut déterminer quelle modalité est à l'origine des difficultés d'apprentissage de la lecture mais les troubles de conscience phonémique sont prépondérants dans la plupart des cas. Les enfants n'ont pas conscience que les mots peuvent être décomposés en plusieurs petites unités de son, les phonèmes et que les mots écrits sont formés de lettre qui correspondent à des phonèmes : c'est ce qu'on appelle la conscience phonémique.

4.2.7.1. La conscience phonémique

De nombreuses études ont montré que le principal processus déficitaire, chez les enfants dyslexiques, était le développement des connaissances phonologiques nécessaires pour identifier et utiliser correctement les phonèmes constituant les mots écrits (Bradley & Bryant, 1985 ; Shaywitz, 1998 ; Wagner & Torgesen, 1987). Les phonèmes sont les plus petits segments de la parole qui, si on les substitue l'un à l'autre, entraînent un changement de sens du mot (Liberman, Cooper, Shankweiler, & Studdert-Kennedy, 1967). L'apprentissage de la lecture nécessite au préalable l'acquisition de certains concepts comme par exemple, la conscience phonémique. Les enfants dyslexiques dont la conscience phonémique est déficiente présentent des difficultés à distinguer et à manipuler les différents sons/phonèmes qui composent les syllabes ou les mots parlés (Bradley & Bryant, 1983 ; Liberman, 1973). Ces capacités de manipulation mentale d'unités sonores de la parole sont décrites sous le terme de « capacités métaphonologiques » (J. Ecalle & A. Magnan, 2002 ; Gombert, 1990).

Nous avons déjà abordé la distinction entre les habiletés épiphonologiques et métaphonologiques (voir section 4.2.4). La plupart des tâches proposées aux enfants dyslexiques évalue leur traitement métaphonologique c'est-à-dire leur conscience des unités discrètes des mots. Par exemple, les enfants dyslexiques seraient incapables d'effectuer une tâche de suppression de phonème initial ou une tâche d'acronyme, c'est-à-dire de fusion de phonèmes (voir les épreuves du test ODÉDYS dans la section 4.6.1.2). L'une des conséquences de tels troubles de conscience phonémique est de rendre difficile l'établissement de relations entre les lettres d'un mot (graphèmes) et les sons (phonèmes) qu'elles représentent. Certains auteurs parlent d'un rôle causal de la conscience phonologique dans l'acquisition de la lecture (Berent & Perfetti, 1995 ; Frost, 1998). En effet, pour lire un mot, nous devons segmenter le mot en lettres ou groupes de lettres et avoir conscience que leur raison d'être et leur emplacement s'explique par leur capacité à représenter des sons. Les dyslexiques présentent des difficultés de décodage et de segmentation des mots ce qui mène à des difficultés d'identification et de compréhension. Malgré des capacités intellectuelles, syntaxiques et de raisonnement normales, ainsi qu'un vocabulaire similaire à celui des normolecteurs, le décodage et l'identification sont si difficiles qu'ils compromettent à terme les traitements sémantiques en lecture. La plupart des modèles qui décrivent l'apprentissage de la lecture supposent que l'utilisation de représentations phonologiques joue un rôle déterminant au cours de l'apprentissage.

Les dyslexiques présentent également des spécificités neuro-anatomiques et leur déficit phonologique est observable sur les données d'imagerie cérébrale lors de tâches de lecture (Démonet, Taylor, & Chaix, 2004 ; Habib, 2000). Les aires cérébrales dédiées au traitement des phonèmes pourraient ainsi être affectées et induiraient des troubles lors d'étapes précoces du processus de la lecture, et par conséquent dans les étapes suivantes. Des études en imagerie cérébrale feraient état d'un dysfonctionnement dans l'hémisphère gauche, en particulier au niveau de la région périsylvienne gauche (Démonet, Thierry, & Cardebat, 2005) pour une revue). Plus récemment, Dufor, Serniclaes, Sprenger-Charolles et Démonet (2007) ont montré un désengagement (hypoactivation) de plusieurs régions dans l'hémisphère gauche de dyslexiques adultes : le gyrus supramarginal et la jonction entre le lobe temporal et le lobe occipital. L'activation de ces régions est fortement corrélée aux processus de perception de la parole (cf. Chapitre 1 section 1.7.2). En contrepartie, les dyslexiques présentent une activation plus forte que les contrôles dans le cortex frontal inférieur droit qui suggère un effort cognitif important. Ces changements de dominance hémisphérique et de connexions entre les régions

cérébrales reflèteraient la mise en place de mécanismes de compensation par les dyslexiques adultes tout au long de leur vie (Shaywitz et al., 2003 ; Simos et al., 2002). Plus précisément, Dehaene et al. (2005) émettent l'hypothèse selon laquelle le gyrus supramarginal gauche est le siège de la perception catégorielle en mode parole. Les dyslexiques présentent des difficultés de perception catégorielle qui peuvent donc être corrélées au fonctionnement cérébral différent dans l'hémisphère gauche.

4.2.7.2. La perception des catégorielle

Dans l'étude de Reed (1989), les enfants ayant des troubles de lecture présentent des difficultés d'identification des consonnes occlusives, en perception de parole, lorsqu'elles sont séparées par un intervalle de temps très court. Ces enfants ne présentent pas de difficultés d'identification pour les voyelles. Les dyslexiques ont un déficit de discrimination des phonèmes, en particulier des consonnes. Ce résultat indiquerait un déficit de traitement d'indices acoustiques brefs qui sont caractéristiques des consonnes occlusives (burst, transitions, VOT). D'autres études montrent que les dyslexiques présentent également un déficit de perception catégorielle des phonèmes. Nous avons déjà défini la notion de perception catégorielle dans le Chapitre 1. La perception catégorielle se définit comme la discrimination des seules différences entre phonèmes et non des variantes acoustiques d'un même phonème (Liberman, Harris, Hoffman, & Griffith, 1957). Pour étudier cette perception catégorielle, l'utilisation de continuum portant sur un trait phonétique est fréquente. Manis et al. (1997), en anglais, utilisent un continuum sur la durée du VOT entre /b-/p/ (/bath/ : VOT = 0 ms ; /path/ : VOT = + 73 ms) pour étudier la perception catégorielle chez des dyslexiques. La frontière catégorielle est similaire pour les dyslexiques et les normo-lecteurs à environ + 21-26 ms, mais les dyslexiques présentent une pente plus faible ce qui rend compte d'une plus faible distinction catégorielle : une zone d'ambiguïté apparaît. Selon Miller, Grosjean et Lomanto (1984), en anglais, la frontière catégorielle entre /b/ et /p/ correspond à 25-35 ms de délai de voisement. Les dyslexiques ont du mal à définir les frontières catégorielles, ils sont moins précis et ils sont aussi moins constants en intra-individuel. Les travaux de Serniclaes et ses collègues (Bogliotti, Serniclaes, Messaoud-Galusi, & Sprenger-Charolles, in press ; Serniclaes, 1987 ; Serniclaes, Bogliotti, & Carré, 2003 ; Serniclaes, Sprenger-Charolles, Carré, & Demonet, 2001 ; Serniclaes, Van Heghe, Mousty, Carré, & Sprenger-Charolles, 2004), en français, ont permis de mettre en évidence plusieurs points importants sur le déficit de perception catégorielle des dyslexiques. Le premier point est que les enfants dyslexiques présentent une frontière catégorielle plus faible que leurs contrôles du même âge pour des

signaux perçus comme de la parole (Serniclaes, Sprenger-Charolles, Carré, & Demonet, 2001). Le second point important est que les enfants dyslexiques sont meilleurs en discrimination intra-catégorielle (à l'intérieur d'une même catégorie) qu'en discrimination inter-catégorielle (de part et d'autre de la frontière catégorielle), et ceci pour des stimuli sinusoïdaux non modulés présentés comme de la parole. Ce dernier constat a mené à émettre l'hypothèse d'un mode de perception allophonique chez les dyslexiques qui expliquerait cette catégorisation d'exemplaires allophoniques (Serniclaes, Van Heghe, Mousty, Carré, & Sprenger-Charolles, 2004). Un premier pic de discrimination, dans un continuum VOT, est observé à +10 ms et un second pic décalé à gauche vers -30 ms. Le premier pic est plus faible pour les dyslexiques que pour les normo-lecteurs alors que l'inverse est observé pour le second pic, il est plus élevé pour les dyslexiques. Ce second pic correspondrait donc à un mode de perception allophonique chez les dyslexiques. Les catégories ne sont pas encore bien définies chez les jeunes dyslexiques ce qui les perturbent dans la discrimination phonémique d'où les difficultés dans des tâches de conscience phonémique et, par conséquent, en lecture. Selon les auteurs, les dyslexiques auraient un déficit de perception allophonique qui serait caractérisé par un trouble de la représentation unitaire des traits phonétiques qui composent les phonèmes. Les auteurs vont même jusqu'à émettre l'hypothèse selon laquelle le déficit de perception allophonique serait la cause du déficit phonologique des dyslexiques et, par conséquent, de leur difficultés en lecture (Bogliotti, Serniclaes, Messaoud-Galusi, & Sprenger-Charolles, in press ; Serniclaes & Sprenger-Charolles, 2003).

Godfrey, Syrdal-Lasky, Millay et Knox (1981) montrent également que les dyslexiques ont des difficultés à donner le nom de la catégorie des stimuli /b, d, g/ dans une tâche d'identification. Le déficit perceptuel de traitement de l'information présentée rapidement aurait pour conséquence un trouble de la perception catégorielle. Par ailleurs, les enfants dyslexiques sont plus sensibles à la complexité phonologique qui existe dans les pseudo-mots par rapport aux mots réels. Les dyslexiques ont un déficit phonémique qui les perturbent dans le traitement des mots écrits et entendus (Snowling, 1981). Ils présentent également plus de difficultés à identifier les mots de basse fréquence lexicale ainsi qu'à reconnaître les pseudo-mots (Snowling, Goulandris, Bowlby, & Howell, 1986). Les spécificités de perception catégorielle observées chez les dyslexiques rendent difficile l'apprentissage de la lecture.

4.2.7.3. La lecture

Le lecteur expert n'a pas conscience du détail des mécanismes cognitifs impliqués en lecture et il ne les contrôle pas tous délibérément, car ils sont rapides et automatiques. Au

cours de l'apprentissage de la lecture, l'enfant devient capable d'identifier rapidement et de manière automatique de plus en plus de mots et de plus en plus rapidement. C'est cette étape de traitement sémantique que ne parviennent pas à mettre en place les enfants dyslexiques, ce qui pénalise alors l'activité de lecture.

Les enfants dyslexiques lisent lentement, de manière hésitante, laborieuse et souvent inexacte pour les mots isolés (lorsqu'aucun contexte de procure d'indication quant au sens). Lors de la lecture à voix haute, la ponctuation n'est pas respectée, la cadence est lente et hachée. Le test de l'Alouette (Lefavrais, 1967) est utilisé, habituellement, pour dépister les troubles de lecture chez l'enfant. L'Alouette est un texte de 256 mots porteur de peu de sens et dans lequel les anticipations correctes sont peu probables, ce qui permet d'évaluer essentiellement les capacités de décodage et d'identification de mots écrits, c'est-à-dire l'âge lexique des participants (voir section 4.6.1). Les dyslexies développementales présentent un dysfonctionnement des processus du langage écrit (lecture et orthographe) mais elles impliquent également d'autres troubles difficultés associées. Par exemple, une mauvaise maîtrise du langage oral (retard de langage ou dysphasie) est souvent mentionnée comme ayant précédé ou accompagné les difficultés de lecture. Nous allons donc voir maintenant les différents troubles associés fréquemment à la dyslexie développementale.

4.2.8. Les troubles associés de la dyslexie développementale

De nombreuses autres difficultés peuvent être associées à la dyslexie et ce, pas uniquement lors de la manipulation des lettres mais également lors de la manipulation des chiffres (dyscalculie), dans des tâches de mémorisation (mémoire à court terme) ou encore dans la coordination des mouvements (dyspraxie). Ces facteurs de comorbidité rendent le diagnostic plus difficile et créent une variabilité importante entre les dyslexiques, qui constituent ainsi une population très hétérogène.

4.2.8.1. La dysphasie

La dysphasie est un trouble du langage oral. Une proportion importante de dyslexiques présente également des troubles sévères de langage oral et ont présenté des difficultés ou un retard de l'apprentissage de la parole. Des troubles d'articulation sont souvent remarqués pouvant contribuer à des déficits en lecture. Heilman, Voeller et Alexander (1996) postulent que la conversion des graphèmes en phonèmes fait intervenir les représentations articulatoires et que ces dernières seraient déficientes chez les dyslexiques. L'étude de Lalain, Demolin, Habib, Nguyen et Teston (2000) appuie cette hypothèse d'anomalies discrètes conduisant à

une mauvaise mise en place des processus impliqués dans les productions orales des dyslexiques. Ils postulent que l'origine du déficit en lecture se situerait au moment de l'acquisition du langage oral.

4.2.8.2. La dysorthographe

Les travaux écrits des personnes dyslexiques sont généralement de faible qualité : elles produisent des phrases extrêmement courtes, le temps nécessaire pour écrire est beaucoup plus long que la normale, la maîtrise de la ponctuation, de la grammaire, de la syntaxe et des suffixes est très insuffisante. Le graphisme lui-même est souvent illisible, les textes comprennent de nombreuses erreurs, même après relecture et on peut retrouver des mots identiques écrits de façon différente dans le même texte. Le trouble qui persiste le plus souvent à l'adolescence et à l'âge adulte est un déficit orthographique (Treiman, 1985).

4.2.8.3. La dyscalculie

La dyscalculie est un trouble d'apprentissage de l'arithmétique. Elle est souvent associée à une dyslexie sévère. De même que la dyslexie, la dyscalculie est dite développementale et est observée chez des enfants ayant un QI normal ayant vécu dans un environnement social et scolaire adéquat. En effet, les représentations des nombres ainsi que des notions de quantité sont faibles chez les dyslexiques. Des anomalies de développement des réseaux neuronaux impliqués dans la perception des nombres sont mises en évidence, notamment au niveau du sillon intrapariétal (Dehaene, Spelke, Pinel, Stanescu, & Tsivkin, 1999).

4.2.8.4. La dyspraxie/La dysgraphie

La dyspraxie correspond à un trouble discret de la coordination des gestes qui serait présent chez 80 % des dyslexiques (Fawcett & Nicolson, 1999 ; Fawcett, Nicolson, & Dean, 1996 ; Nicolson & Fawcett, 1990 ; Nicolson, Fawcett, & Dean, 2001). Ce trouble se manifeste, la plupart du temps, par une maladresse et une incapacité à exécuter des gestes fins, comme par exemple, l'écriture : on parle alors de dysgraphie. L'observation de ce trouble est à la base de la théorie cérébelleuse qui se propose d'expliquer la dyslexie. Nous reviendrons plus en détail sur cette théorie dans la section 4.3.1.

4.2.8.5. Les troubles de mémoire à court terme

La mémoire de travail auditivo-verbale à court terme est très sollicitée au début de l'apprentissage de la lecture. La plupart des dyslexiques ont des difficultés à maintenir active en tête une certaine quantité d'information, ce qui, en lecture, empêche de garder le sens de

chaque phrase afin de la relier à la phrase suivante. Miles (1993) rapporte que les dyslexiques présentent un déficit dans une tâche d'empan de mémoire digitale et encore plus dans une tâche d'empan à l'envers.

4.3. Les différentes théories sur les mécanismes cognitifs responsables de la dyslexie développementale

Différentes hypothèses ont cherché à relier les difficultés observées chez les dyslexiques avec des déficits plus profonds, en lien avec les traitements perceptifs (vision ou audition) ou avec les traitements phonologiques. Plusieurs voies de recherche ont été explorées pour tenter d'expliquer ces problèmes d'apprentissage de la lecture. Trois théories majeures sont actuellement en compétition pour tenter d'expliquer les mécanismes déficients dans la dyslexie : (1) la théorie du déficit phonologique due à un problème essentiellement linguistique, (2) la théorie magnocellulaire qui évoque des troubles de traitement temporel au niveau visuel et au niveau auditif et (3) la théorie cérébelleuse.

4.3.1. La théorie du déficit phonologique

Le déficit phonologique est, pour de nombreux auteurs, l'axe de recherche le plus solide pour expliquer ce qui conduit à la dyslexie. Les processus cognitifs responsables des difficultés d'apprentissage de la lecture seraient de nature phonologique et de manière générale, plus en lien avec le langage oral qu'avec la perception visuelle (Frith, 1999 ; Snowling, 2000, , 2001). Les tâches de lecture de pseudo-mots permettent, particulièrement, d'évaluer les capacités de traitement phonologique (pour une revue voir (Rack, Snowling, & Olson, 1992). Les tâches de détection d'intrus, de jugement de similarité phonologique, de détection d'unités phonologiques communes, de segmentation syllabique et phonémique et une tâche de suppression de l'attaque de la syllabe permettent d'évaluer le niveau d'habileté phonologique des dyslexiques.

Le déficit phonologique touche principalement la capacité à manipuler les représentations sonores des segments de parole : *la conscience phonologique* (Wagner & Torgesen, 1987 ; Witton et al., 1998). Les dyslexiques présentent d'importantes difficultés dans des tâches de suppression de phonème initial. Particulièrement, sur des groupes consonantiques en début de mot (Bruck & Treiman, 1990) car l'accès au phonème individuel est difficile. Temple et al.

(2001) montrent également des difficultés lors de tâches de jugement de rimes. Un consensus existe pour dire que la conscience phonologique est affaiblie ce qui constituerait le déficit principal de la dyslexie. Un entraînement métaphonologique est possible et efficace pour remédier à ces déficits (Lundberg, Frost, & Petersen, 1988).

Le déficit central décrit par la théorie phonologique se situerait au niveau des représentations phonémiques, elles-mêmes. Ce trouble est notamment observé dans des tâches de *perception catégorielle* dans lesquelles un enfant doit catégoriser par exemple les syllabes /ba/ ou /da/ réparties en un continuum artificiel de part et d'autre de la frontière catégorielle entre deux syllabes. Les dyslexiques présentent des difficultés à effectuer cette tâche de perception catégorielle (Reed, 1989), plus particulièrement pour des syllabes proches de la frontière inter-catégorielle, et qui s'opposent par le lieu d'articulation (/ba/-/da/) ou par le voisement (/ba/-/pa/) (Manis et al., 1997).

Pour résumer, la théorie phonologique évoque essentiellement l'existence de représentations anormales des unités phonémiques menant à des difficultés pour acquérir des bases nécessaires à l'apprentissage de la lecture. Cette atteinte phonologique peut être de natures différentes : au niveau de la conscience phonémique ou par exemple de la mémoire verbale à court terme. Un consensus existe pour dire que le dysfonctionnement des représentations phonologiques est une cause directe de la plupart des difficultés de lecture chez les dyslexiques. Mais, des contestations apparaissent quant à leur origine : un dysfonctionnement de bas niveau et plus général affecterait la perception auditive, visuelle et articulatoire (Pennington, van Orden, Smith, Green, & Haith, 1990 ; Rack, 1994 ; Snowling, 1981). Par exemple, des études ont montré que les dyslexiques ont des difficultés de perception de la parole dans le bruit de par l'altération à la base de leurs représentations phonologiques (Brady, Shankweiler, & Mann, 1983 ; Cornelissen, Hansen, Bradley, & Stein, 1996). Le bruit masque le signal de parole empêchant une extraction et un traitement corrects des indices acoustiques, ce qui amène les dyslexiques à mal catégoriser les phonèmes et par conséquent, à faire plus d'erreurs (confusions) que leurs contrôles.

La question est donc de savoir si le déficit phonologique a lui-même pour cause un déficit auditif. Les troubles auditifs ne sont pas nécessaires, ni suffisants pour expliquer la dyslexie (pour une revue voir Rosen, 2003). Rosen (2003) présente de nombreux arguments contre la théorie d'un déficit auditif de traitement temporel rapide. Notamment, il montre que même si certains traitements auditifs sont défailants (Rosen & Manganari, 2001 ; Witton et al., 1998), tous ne le sont pas (Witton et al., 1998) et qu'ils ne représentent qu'une faible proportion. Un second argument est qu'aucune corrélation entre la sévérité du déficit auditif et les troubles de

langage n'a été obtenue. Les déficits des mauvais lecteurs seraient imputables à leur perception spécifique de la parole, c'est-à-dire à sa nature phonologique et non auditive. Des études ont montré que le déficit de discrimination des phonèmes ne s'accompagne pas forcément d'un déficit de traitement des stimuli analogues non-verbaux (Mody, Studdert-Kennedy, & Brady, 1997 ; Rosen & Manganari, 2001). De même, des enfants avec de faibles habiletés phonologiques n'ont pas de problème pour rappeler des stimuli non verbaux très rapides (Nittrouer, 1999). L'ensemble de ces résultats est en accord avec un déficit perceptif spécifique à la parole plutôt qu'un déficit perceptif auditif général. Cependant, l'étude de Nagarajan et al. (1999) montre que le trouble de lecture est corrélé à une représentation neuronale anormale des stimuli auditifs brefs et rapides mais pas aux informations de nature langagière. Une faible réponse corticale à des stimuli brefs et successifs a été observée chez des adultes faibles lecteurs, celle-ci est corrélée aux difficultés de discrimination, de reconnaissance de stimuli acoustiques présentés rapidement et successivement. Serniclaes, Sprenger-Charolles, Carré et Démonet (2001) argumentent dans le sens où le déficit de traitement temporel serait de nature linguistique. Dans une tâche de discrimination de stimuli variant le long d'un continuum de lieu d'articulation /ba-da/, les dyslexiques se caractérisent par un pic de discrimination plus faible et une meilleure discrimination intra-catégorielle que les contrôles normo-lecteurs pour des stimuli verbaux alors que pour des stimuli non-verbaux, les résultats ne diffèrent pas entre les deux groupes. Cette étude montre que les dyslexiques présentent un déficit de perception catégorielle pour des stimuli présentés comme des stimuli analogues verbaux mais pas pour des stimuli analogues non-verbaux.

De plus, si le déficit auditif était la cause de la dyslexie, il devrait être présent chez tous les dyslexiques, or ce n'est pas le cas : 40 % des dyslexiques présenteraient un déficit auditif (Ramus, 2003) donc la plupart n'en aurait pas. Le déficit auditif n'est donc pas la cause du trouble langagier mais semble associé à celui-ci. Ainsi, des études privilégient l'hypothèse du déficit du traitement phonologique (Ramus et al., 2003).

D'autres hypothèses d'explication de la dyslexie développementale confèrent un rôle plus déterminant aux troubles sensoriels. C'est le cas de la théorie magnocellulaire qui relie les troubles phonologiques des dyslexiques à un déficit de traitement temporel général aussi bien en modalité visuelle qu'auditive.

4.3.2. La théorie magnocellulaire

Cette théorie repose à la base sur un trouble de la perception visuelle, nous présenterons donc, en premier, le versant visuel de la théorie magnocellulaire puis, en deuxième, nous aborderons le versant auditif de la théorie.

4.3.2.1. La théorie du déficit du traitement temporel visuel

À la fin du XIX^e siècle, la dyslexie était décrite comme un problème d'origine visuelle : on parlait de « cécité verbale » (Déjerine, 1892). En effet, les principales erreurs décrites chez des dyslexiques étaient des confusions entre des lettres proches visuellement (/b/, /d/, /p/ et /q/). Cette idée de déficit des processus visuels était encore reprise dans les années 80, notamment par les nombreux travaux de Lovegrove.

Entre la rétine et le cortex, deux voies distinctes acheminent les informations visuelles de manière spécifique. La ségrégation des informations visuelles débute au niveau de la rétine mais elle est le plus marquée au niveau du noyau géniculé latéral qui se compose d'une couche ventrale (magnocellules) et d'une couche dorsale (parvocellules). Le traitement des stimuli visuels brefs et à changement rapide est principalement effectué par les grosses cellules (magnocellules) qui constituent le système magnocellulaire alors que le traitement des stimuli visuels statiques dépend de plus petites cellules (parvocellules) qui composent le système parvocellulaire (Merigan & Maunsell, 1993). Le système magnocellulaire est spécialisé dans le traitement des contrastes et est donc plus sensible aux faibles contrastes. Lovegrove et ses collègues suggèrent que les dyslexiques présenteraient des anomalies au niveau du système magnocellulaire qui est impliqué dans le traitement temporel rapide des stimuli visuels (cités par Galaburda & Livingstone, 1993 ; Galaburda, Menard, & Rosen, 1994 ; Lovegrove, Bowling, Badcock, & Blackwood, 1980 ; Lovegrove, Garzia, & Nicholson, 1990 ; Lovegrove, Martin, & Slaghuis, 1986). Notamment, les dyslexiques présenteraient plus de difficultés pour détecter des stimuli présentés rapidement que les normo-lecteurs (Martin & Lovegrove, 1987). Au contraire, les dyslexiques n'auraient aucun problème pour des stimuli visuels statiques, traités par le système parvocellulaire, par rapport à des stimuli rapides, ce qui appuie l'hypothèse de la théorie magnocellulaire. Des anomalies morphologiques et fonctionnelles des magnocellules au niveau du noyau géniculé latéral, lors de l'embryogénèse au moment de la migration des cellules, seraient une cause de ce dysfonctionnement. En effet, l'observation *post-mortem* de cerveaux de dyslexiques rend compte d'anomalies anatomiques des couches de magnocellules du noyau géniculé latéral :

une diminution importante de la taille (plus de 20%) des neurones de la voie magnocellulaire chez les dyslexiques (Livingstone, Rosen, Drislane, & Galaburda, 1991). De plus, dans cette même étude les données en électroencéphalographie témoignent d'un retard et d'une diminution dans le traitement de stimuli rapides et à faible contraste chez les dyslexiques, alors qu'aucune différence avec un groupe contrôle n'est observée pour les stimuli lents et à fort contraste. Ce déficit visuel de traitement temporel rapide a été également observé chez le singe présentant une lésion cérébrale spécifique au niveau de la couche magnocellulaire du noyau géniculé latéral (Merigan & Maunsell, 1993). Deux résultats importants appuient donc l'hypothèse d'un dysfonctionnement magnocellulaire spécifique au traitement temporel visuel : (1) une vitesse de conduction moins rapide chez les dyslexiques du fait de la présence de neurones plus petits (plus petits axones) dans la couche magnocellulaire et (2) le délai des réponses électrophysiologiques aux faibles contrastes qui rend compte d'un système magnocellulaire plus lent. Un déficit de traitement de stimuli en mouvement a également été montré chez les dyslexiques (Cornelissen, Richardson, Mason, Fowler, & Stein, 1995) et confirmé grâce aux potentiels évoqués visuels (Schulte-Körne, Bartling, Deimel, & Remschmidt, 2004) et à l'IRMf (Eden et al., 1996). Ces résultats rendent compte du dysfonctionnement de la voie magnocellulaire visuelle chez les dyslexiques alors que la voie parvocellulaire ne semble pas atteinte.

Plusieurs études ont suggéré un lien entre les déficits du système magnocellulaire et des difficultés en lecture. La lecture fait intervenir, en premier lieu, des capacités visuelles. La mobilité des images rétiniennes des mots et la succession rapide de l'information visuelle en lecture dépendraient donc en grande partie du système magnocellulaire spécialisé dans le traitement des stimuli visuels brefs et à changement rapide. Or, les enfants dyslexiques ont des difficultés à percevoir des stimuli brefs qui se succèdent rapidement (Hari & Renvall, 2001). De plus, Stein et Fowler (1981) font état d'une instabilité de fixation oculaire due à un dysfonctionnement des voies magnocellulaires visuelles causant ainsi des troubles de lecture. La lecture devient ainsi inconfortable, l'enfant va éviter de lire au maximum et son développement des capacités de reconnaissance des mots va donc être altéré. Ces résultats pris ensemble permettent de penser qu'un déficit du système magnocellulaire pourrait être la cause de confusions visuelles lors de la lecture (Stein, Richardson, & Fowler, 2000 ; Stein & Walsh, 1997).

Une autre hypothèse d'explication de la dyslexie est basée sur un déficit perceptif auditif. De nombreuses études ont rapporté un traitement auditif ralenti chez les dyslexiques

suggérant qu'il serait possible que le même système rapide que pour les stimuli visuels soit déficient pour la modalité auditive (Reed, 1989 ; Tallal, 1980a, , 1984 ; Tallal & Piercy, 1973).

4.3.2.2. La théorie du déficit du traitement temporel auditif

L'équivalent du système magnocellulaire n'existe pas pour l'audition mais des neurones de grande taille spécialisés dans le traitement des stimuli auditifs rapides ont été mis en évidence ainsi que des anomalies de cellules analogues aux magnocellules visuelles dans les noyaux géniculés médians chez des adultes anciens dyslexiques (Galaburda, Menard, & Rosen, 1994). Ces anomalies seraient à l'origine des difficultés pour le traitement temporel des phonèmes. La reconnaissance des phonèmes nécessite un traitement temporel très précis du signal de parole dépendant de la quantité d'informations intactes. Le traitement des changements rapides et brefs ou des événements successifs présentés rapidement est critique pour la reconnaissance des phonèmes et peut donc être perturbé par un dysfonctionnement de ces cellules auditives.

La théorie du déficit auditif du traitement temporel porte sur trois points importants (pour une revue voir Farmer & Klein, 1995). Le premier est la discrimination des sons, les dyslexiques sont très sensibles à la résolution spectrale et temporelle des signaux acoustiques complexes (cas de la parole), ils présentent des difficultés de discrimination aussi bien au niveau des caractéristiques fréquentielles (Ahissar, Protopapas, Reid, & Merzenich, 2000 ; Hill, Bailey, Griffiths, & Snowling, 1999 ; McAnally & Stein, 1996), que de la durée (McAnally & Stein, 1996) ou de l'intensité (Ahissar, Protopapas, Reid, & Merzenich, 2000). L'identification de la parole nécessite une étape de discrimination des phonèmes avec une analyse précise des fréquences sur de très courtes durées (transition formantique ≈ 40 ms). Ces difficultés d'analyse seraient à l'origine du déficit de traitement temporel des phonèmes. Le système auditif des dyslexiques aurait une faible résolution temporelle, entraînant des déficits dans le traitement et l'encodage des transitions rapides et des sons brefs. Schwartz et Tallal (1980) montrent, lors d'une tâche d'écoute dichotique, que l'asymétrie pour le traitement de la parole est modifiée lorsqu'un stimulus, dont la transition formantique est allongée de 40 à 80 ms, est présenté. L'analyse des transitions auditives rapides (40 ms) nécessaire dans la compréhension du langage est spécifiquement assurée par l'hémisphère gauche. Pourtant, l'avantage de l'oreille droite bien connu dans le traitement spécifique des stimuli verbaux est réduit lorsque la durée de la transition formantique est allongée à 80 ms. Par conséquent, la spécialisation de l'hémisphère gauche pour le traitement temporel des

transitions rapides est réduite lorsque la durée de la transition s'allonge. L'allongement des transitions va désorganiser la dynamique temporelle de la parole, ce qui la rend moins compréhensible et l'éloigne d'une identité verbale, d'où le changement d'asymétrie hémisphérique. La dynamique temporelle du signal de parole est donc primordiale pour une identification correcte.

L'hypothèse du déficit auditif de traitement temporel a été testée par Tallal et Piercy (1973). Les enfants dyslexiques auraient des difficultés à percevoir les différences acoustiques parmi les indices brefs du signal de la parole : les dysfonctionnements au niveau auditif gênent donc l'acquisition de la conscience phonémique et l'élaboration d'un code phonologique précis et organisé, tous deux nécessaires à l'apprentissage de la lecture. Si la durée des stimuli est artificiellement allongée lors d'un programme d'entraînement, le déficit disparaît et les performances augmentent pour une tâche de discrimination de phonèmes (Tallal & Piercy, 1975). Tallal (1980a) met en évidence, chez 8 enfants SLI, un déficit spécifique du traitement de stimuli auditifs se succédant rapidement ce qui les empêcheraient d'entendre des différences acoustiques. Cette théorie du déficit de traitement temporel de l'information rapide est très prometteuse pour comprendre les mécanismes impliqués dans la dyslexie. Une ouverture vers de nouvelles perspectives a été possible grâce à des techniques de rééducation (Merzenich et al., 1996 ; Tallal et al., 1996) basée sur un allongement de la durée du signal. Ces études ont montré une amélioration des performances d'identification des mots, chez des enfants atteints de trouble d'apprentissage de la lecture, après un entraînement auditivo-verbal comportant un allongement du signal acoustique. Cependant, ces études ont fait l'objet de nombreuses critiques, notamment sur la nature de la population étudiée, sur la validité de la théorie et sur la pertinence de l'aspect « allongement », puisque des effets aussi positifs seraient produits par un entraînement sur des stimuli non allongés (Rey, De Martino, Espesser, & Habib, 2002). L'étude Rey et al. (2002) utilise également des stimuli temporellement étirés mais l'effet bénéfique de l'entraînement avec des stimuli étirés n'est pas plus fort que si l'entraînement est fait avec des stimuli non étirés, ce qui remet en cause l'idée d'un déficit de traitement temporel général à l'origine des troubles phonologiques de la dyslexie.

Pourtant, chez l'adulte dyslexique, les troubles de traitement temporel auditif sont encore présents (Hari & Kiesilä, 1996). La première difficulté correspond à la détection et la discrimination des sons séquentiels lorsque d'autres sons précèdent ou suivent deux sons à différencier. Witton et al. (1998) montrent par exemple une faiblesse dans la détection rapide

d'indices acoustiques successifs pertinents pour discriminer les sons de parole chez des adultes dyslexiques par rapport à des normo-lecteurs. Une composante électrophysiologique, la MisMatch Negativity (MMN), est un marqueur neuronal qui apparaît lorsqu'un changement acoustique est détecté. L'apparition d'une MMN témoigne d'un traitement auditif de bas niveau et pré-attentionnel (Näätänen, 2001). L'étude de Kujala et al. (2000) indique une réponse anormale de la MMN chez les dyslexiques, ils ne perçoivent pas tous les changements acoustiques dans une séquence de sons, ce qui rend compte de difficultés de traitement temporel des sons. Cette étude confirme un déficit de traitement temporel des informations auditives non-linguistiques, ce qui suggère que la discrimination d'indices acoustiques temporels nécessaires à l'identification de la parole est problématique chez les dyslexiques. Par ailleurs, de faibles capacités de lecture des non-mots seraient associées à une perception temporelle auditive altérée chez l'adulte dyslexique. Une étude en IRMf chez des normo-lecteurs (Temple et al., 2000) met en évidence une activité cérébrale préfrontale en réponse à des stimuli non linguistiques avec des changements rapides (en opposition à des changements plus lents) qui n'apparaît pas chez les dyslexiques. Cependant, cette région semble présenter une certaine plasticité car un changement de sensibilité a été obtenu chez des adultes dyslexiques après un entraînement intensif basé sur le traitement auditif et les capacités du langage oral (Temple et al., 2003).

Une seconde difficulté rencontrée par les dyslexiques est la détection et la discrimination des sons séquentiels lorsqu'il faut séparer deux sources sonores (streaming). Helenius et al. (1999) montrent un déficit de ségrégation des flux auditifs non-verbaux chez des adultes dyslexiques. La différence entre les deux flux est perçue par les adultes dyslexiques lorsque la vitesse de présentation est plus lente par rapport au groupe contrôle. La séparation des flux peut être reliée à la perception de la parole et notamment à des difficultés à segmenter la séquence de sons de parole et donc à prendre conscience des phonèmes ainsi que de l'ordre des phonèmes qui la composent. L'accès aux représentations phonologiques est, par conséquence, plus lent. Les auteurs émettent l'hypothèse selon laquelle les adultes dyslexiques utiliseraient une fenêtre d'intégration temporelle plus large pendant laquelle les premiers phonèmes affecteraient l'identification des phonèmes suivants, par exemple, en masquant les transitions brèves. Ces résultats suggèrent que le dysfonctionnement auditif affecterait les capacités à utiliser les représentations phonologiques indispensables à la lecture.

Le troisième point est la *détection de signaux acoustiques brefs présentés dans le bruit*. Selon l'hypothèse auditive de la dyslexie de Tallal (1980b), l'établissement des compétences pertinentes pour la lecture est lié à une perception auditive normale. Des études portant sur l'environnement sonore à l'école ont montré qu'une classe bruyante pouvait aggraver les déficiences d'enfants avec des problèmes de lecture (Bradlow, Kraus, & Hayes, 2003 ; Ziegler, Pech-Georgel, George, Alario, & Lorenzi, 2005). L'enfant en retard de lecture montrerait plus de difficultés à la compréhension de la parole dans le bruit (Bradlow, Kraus, & Hayes, 2003 ; Brady, Shankweiler, & Mann, 1983 ; Cunningham, Nicol, Zecker, Bradlow, & Kraus, 2001 ; Jerger, Martin, & Jerger, 1987). Donc, même si on ne peut pas en déduire un lien de cause à effet, il est envisageable que le fonctionnement du système auditif soit en lien avec les processus cognitifs de traitement des mots écrits.

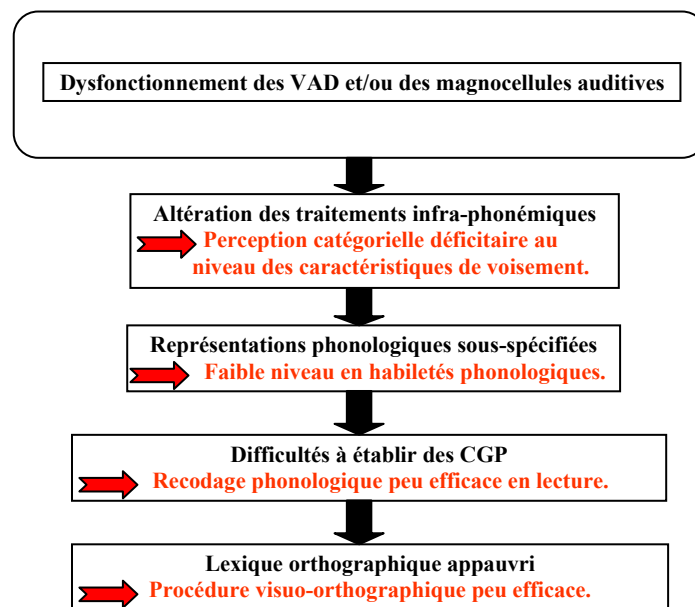


Figure 49 : Schématisation de la théorie magnocellulaire.

4.3.2.3. Conclusion

Selon les travaux de Stein (Stein, 2001 ; Stein & Walsh, 1997), les cellules magnocellulaires visuelles et auditives seraient altérées causant une perturbation de la perception de certains types de stimuli à succession rapide et peu contrastés. La théorie magnocellulaire reposerait sur une anomalie neurologique unique qui atteindrait toutes les magnocellules de toutes les voies sensorielles. L'hypothèse d'un déficit général des processus de traitement temporel au niveau magnocellulaire et pour tous les systèmes sensoriels est proposée (pour une revue voir Hari & Renvall, 2001 ; Stein, 1994 ; Stein & Walsh, 1997 ; Witton et al., 1998). Les anomalies observées au niveau de la voie magnocellulaire

entraîneraient un dysfonctionnement des connexions anatomiques arrivant au cortex pariétal postérieur qui supporte des fonctions cérébrales en lien avec la lecture (Vidyasagar, 2004) et au cervelet (Stein & Walsh, 1997). Cette hypothèse permet de présenter encore deux autres théories explicatives à la dyslexie développementale : l'une attentionnelle et l'autre cérébelleuse.

L'hypothèse attentionnelle repose sur l'observation clinique d'enfants dyslexiques ne présentant pas de trouble phonologique majeur, mais qui sont déficients dans des tâches visuo-attentionnelles qui nécessitent l'activation du cortex pariétal (Valdois, Bosse, & Tainturier, 2004). Valdois et al. (2003), à partir d'une étude de cas, met en évidence une dissociation entre le trouble phonologique et le trouble visuo-attentionnel. Bosse et Valdois (2002) observent qu'une forte proportion des dyslexiques ont un trouble visuo-attentionnel.

La théorie magnocellulaire peut rendre compte directement de troubles auditifs et visuels, mais elle peut aussi, d'une part, expliquer les troubles phonologiques par un déficit auditif et d'autre part, révéler que les troubles moteurs sont liés à un dysfonctionnement des voies magnocellulaires du cortex pariétal et du cervelet. Par contre, la théorie magnocellulaire ne parvient pas à expliquer pourquoi il existe une prévalence du déficit phonologique par rapport aux troubles sensorimoteurs dans la population de dyslexiques (Ramus et al., 2003 ; Rosen, 2003). Le cervelet reçoit beaucoup de projections du système magnocellulaire et ses fonctions pourraient donc être perturbées.

L'hypothèse d'un dysfonctionnement cérébelleux est mis en relation avec une tendance à la maladresse, des problèmes d'équilibre et de coordination motrice caractéristiques chez de nombreux dyslexiques (Nicolson, Fawcett, & Dean, 2001). En effet, le cervelet intervient dans le contrôle moteur, et notamment dans l'articulation de la parole. Si l'articulation est perturbée ou imprécise, cela peut conduire à la mise en place de représentations phonologiques imparfaites. Le cervelet intervient également dans l'automatisation des procédures. Or, les dyslexiques n'automatisent pas les principales opérations mentales nécessaires à la lecture. Un tel trouble d'automatisation pourrait perturber l'apprentissage des correspondances grapho-phonémiques. La théorie cérébelleuse met en évidence des troubles moteurs chez des enfants dyslexiques (Fawcett & Nicolson, 1999 ; Fawcett, Nicolson, & Dean, 1996) , et des difficultés d'automatisation des procédures et des troubles de l'équilibre (Nicolson & Fawcett, 1990). L'imagerie cérébrale a mis en évidence des anomalies anatomiques, métaboliques et d'activation du cervelet chez des dyslexiques adultes (Leonard et al., 2001 ; Nicolson et al., 1999). Nicolson, et al. (1999) montrent ainsi une hypoactivation du cervelet droit et du gyrus cingulaire chez des dyslexiques adultes. Ces régions sont reliées

aux aires motrices frontales et à l'aire de Broca. Pour ces auteurs, 80% des dyslexiques présenteraient un trouble cérébelleux, mais cela ne fait pas l'objet d'un consensus (Ramus, 2003 ; Wimmer, Mayringer, & Landerl, 1998). En proportion, des études rapportent des troubles auditifs dans 0 à 50% des dyslexiques, contre 0 à 25% pour les troubles visuels, 0 à 80% pour les troubles moteurs et 75 à 100% pour les troubles phonologiques (Heath, Hogben, & Clark, 1999 ; Witton et al., 1998). Ce dernier résultat met en évidence le rôle incontestable du déficit phonologique comme cause principale de la dyslexie. Il est important de noter que l'hypothèse du double déficit qui associe des troubles phonologiques à des troubles de traitement temporel rapide est également envisagée (Wolf & Bowers, 1999).

Les dyslexiques se caractérisent aussi par des anomalies anatomo-fonctionnelles dans les situations de lecture, comme le montrent les données en imagerie cérébrale. Nous allons présenter maintenant les corrélats anatomiques, métaboliques et fonctionnels de la dyslexie développementale.

4.4. Les corrélats neurobiologiques de la dyslexie

La dyslexie serait liée à un fonctionnement cérébral atypique. Grâce aux techniques d'imagerie cérébrale, il a été possible d'observer les conséquences des anomalies neurologiques sur les fonctions cognitives, en particulier sur le langage. Les dyslexiques présenteraient des anomalies de maturation du cerveau et, par conséquent, des connexions cortico-corticales anormales en cause dans les difficultés d'apprentissage de la lecture.

4.4.1. Le sexe ratio et la cause hormonale

La prévalence des garçons touchés par la dyslexie est attestée depuis longtemps, mais son origine est aujourd'hui encore discutée. Selon Rutter et al. (2004), les troubles de lecture touchent de manière générale davantage les garçons que les filles. Toutefois, d'autres études montrent que les garçons et les filles sont touchés de la même manière (Flynn & Rahbar, 1994 ; Shaywitz, Shaywitz, Fletcher, & Escobar, 1990). Feldman et al. (1995) précisent que les garçons ne sont pas plus représentés dans la population étudiée que les filles mais qu'ils présentent une dyslexie avec un degré de sévérité plus important (pour une étude comparative voir Miles, Haslum, & Wheeler, 1998). Le taux plus important de garçons atteints de dyslexie aurait une possible cause hormonale, un excès de testostérone du fœtus, ayant une incidence

sur le développement nerveux Le terme de conflit « immuno-hormonal » est utilisé pour faire référence à une relation complexe entre une cause génétique, un dysfonctionnement du système immunitaire, du système hormonal et les troubles du langage chez les dyslexiques (Geschwind & Galaburda, 1985 ; Habib, 2000 ; Hugdahl, Synnevag, & Satz, 1990). La dyslexie est à la fois un handicap familial et héréditaire (Pennington & Gilger, 1996). Un enfant, ayant un proche parent dyslexique, a en effet 40 à 60 % de risque d'être aussi dyslexique. Ce risque augmente lorsque d'autres parents présentent des troubles similaires.

4.4.2. Les causes génétiques

La dyslexie est considérée comme un trouble neurologique avec des origines génétiques et elle aurait des corrélats neurobiologiques universels importants (Paulesu et al., 2001). Les chercheurs ont exploré la relation entre les troubles liés à la dyslexie et la variabilité génétique qui représente environ 0.1 % de notre génome. Plusieurs études en génétique ont montré des liens entre les difficultés d'apprentissage des dyslexiques et les chromosomes 2, 3, 6, 15, 18 et X (Cardon et al., 1994 ; Fisher et al., 2002 ; Fisher et al., 1999 ; Gayan et al., 1999 ; Schulte-Körne et al., 1998 ; Schumacher, Hoffmann, Schmäl, Schulte-Körne, & Nöthen, 2007). Même si la probabilité qu'il existe un seul et unique gène de la dyslexie paraît faible, l'étude de Taipale et ses collaborateurs (2003) a révélé l'existence d'un gène, le *DYX1C1*, qui serait un bon candidat à l'origine de la dyslexie développementale. La relation entre la dyslexie et le chromosome 15 a été suggérée en premier, en 1983, par Smith et ses collaborateurs (Smith, Kimberling, Pennington, & Lubs, 1983). Puis, le lien particulier avec le locus *DYX1* sur le chromosome 15q21 a été confirmé (Morris et al., 2000 ; Schulte-Körne et al., 1998). Ce gène *DYX1C1* est impliqué dans le développement et la maturation du cerveau. Il se retrouve dans les cellules neuronales et gliales du néocortex et joue un rôle dans la migration neuronale (Wang et al., 2006). La migration neuronale lors du développement embryonnaire du néocortex serait perturbée par le dysfonctionnement de ce gène (translocation au niveau du gène), ce qui donnerait lieu à la désorganisation neuronale observée au niveau cérébral chez certains dyslexiques (Rosen et al., 2007). Néanmoins, ce gène découvert chez une population finlandaise, ne serait pas associé à la dyslexie dans d'autres populations : américaine, anglaise, italienne et canadienne (Marino et al., 2005 ; Meng, Hager et al., 2005 ; Scerri et al., 2004 ; Wigg et al., 2004). Par conséquent, l'absence de réplique des résultats de Taipale et al. (2003) semble indiquer que ce gène ne jouerait pas un rôle significatif dans le développement de la dyslexie dans des populations non finnoises. Selon Schumacher et al. (2007), le rôle de deux autres gènes dans la dyslexie paraît plus convainquant : *DCDC2* et

KIAA0319 sur le chromosome 6 (pour une revue voir Fisher & Francks, 2006). Une inhibition de ces deux gènes aurait en effet pour conséquence de perturber la migration neuronale corticale et l'activité des régions cérébrales de l'hémisphère gauche, deux caractéristiques physiopathologiques de la dyslexie (Meng, Smith et al., 2005 ; Paracchini et al., 2006). Cependant, il est difficile d'établir des liens solides de cause à effet avec les troubles d'apprentissage de la lecture. De même, le gène ROBO1 sur le chromosome 3 (Hannula-Jouppi et al., 2005 ; Nopola-Hemmi et al., 2001) jouant un rôle dans la migration neuronale serait en lien avec les difficultés de lecture chez l'Homme. Bien que des gènes aient été identifiés comme ayant un lien avec la dyslexie développementale, autant par leur rôle dans la migration neuronale que par leur situation corticale au niveau des aires du langage, des explications supplémentaires restent à apporter. Les recherches sur les origines génétiques de la dyslexie sont encore incomplètes, de nouvelles études doivent être entreprises afin de clarifier les relations entre les arrangements génétiques observés et les mécanismes neuronaux mis en cause dans les difficultés d'apprentissage de la lecture.

Dans la partie suivante, nous présentons les anomalies anatomo-fonctionnelles de la dyslexie développementale, en commençant par les études pionnières *post-mortem* jusqu'aux techniques d'imagerie cérébrale les plus récentes.

4.4.3. Les études *post-mortem*

4.4.3.1. Les anomalies anatomiques

Les travaux les plus importants dans ce domaine ont été ceux de Galaburda, Sherman, Rosen, Aboitiz et Geschwind (1985) qui ont été les premiers à étudier au microscope, *post-mortem*, les cerveaux de dyslexiques. Ils ont alors découverts de petites malformations à la surface du cerveau : des dysplasies (organisation anarchique au sein des couches cellulaires), des accumulations de matière grise appelées des ectopies dans la couche la plus superficielle du cortex avec une prédominance dans l'hémisphère gauche, plus précisément dans les aires spécifiques au langage (région périsylvienne gauche), reflet d'une migration anormale des neurones en cours de maturation (Galaburda & Kemper, 1979). Ces ectopies apparaissent également dans les voies magnocellulaires de transmission de l'information visuelle (Livingstone, Rosen, Drislane, & Galaburda, 1991). De plus, des polymicrogyri (accumulations focales de neurones réalisant de véritables micro-circonvolutions) ont été décrits plus particulièrement dans l'aire de Wernicke. Galaburda, Menard et Rosen (1994)

montrent une asymétrie anormale des noyaux géniculés médians du système auditif des dyslexiques. Les auteurs observent une désorganisation des couches cellulaires et une petite taille des cellules dans le noyau géniculé médian gauche des cerveaux de dyslexiques. Ces anomalies peuvent être reliées au déficit de traitement auditif présenté par les dyslexiques. L'origine de ces anomalies développementales a été décrite par Geschwind et Galaburda (1985) comme une prédisposition génétique associée à un conflit immuno-hormonal *in-utero*.

4.4.3.2. La latéralisation hémisphérique

Des anomalies de l'asymétrie de certaines régions cérébrales impliquées dans les fonctions langagières ont également été mises en évidence, cependant les régions incriminées ne font pas l'objet d'un consensus. Geschwind et Levitsky (1968) montrent une asymétrie des lobes temporaux droit et gauche sur des cerveaux sains *post-mortem*. Des études ont montré, chez les dyslexiques, une réduction de l'asymétrie du *planum temporale* (sa taille est accrue dans l'hémisphère droit) qui est impliqué dans la compréhension verbale et le traitement phonologique (Galaburda, Sherman, Rosen, Aboitiz, & Geschwind, 1985 ; Humphreys, Kaufmann, & Galaburda, 1990 ; Rumsey et al., 1997 ; Shapleske, Rossell, Woodruff, & David, 1999). Certains auteurs posent l'hypothèse d'un défaut de latéralisation du langage à l'origine de la dyslexie (Orton, 1925 ; Stein, 1994). Des études, en imagerie cérébrale, rendent compte d'une asymétrie du *planum temporale* et du lobe pariétal inférieur (Eckert & Leonard, 2000 ; Hoeft et al., 2007), ainsi que d'anomalies morphologiques du corps calleux qui seraient à l'origine d'un transfert anormal d'informations entre les deux hémisphères cérébraux (Rumsey et al., 1996), nous allons présenter ces études dans la section suivante.

4.4.4. Les études en imagerie cérébrale

Grâce aux techniques d'imagerie cérébrale, des observations anatomo-fonctionnelles ont pu être faites. Les corrélats neurobiologiques de la dyslexie ont pu être ainsi étayés par ces nouvelles données (pour une revue voir Eckert, 2004).

4.4.4.1. L'imagerie structurale

La méthodologie VBM, ou *voxel-based-morphometry* (Ashburner & Friston, 2000), a récemment été utilisée dans de multiples études pour étudier la structure morphologique du cerveau (Brambati et al., 2004 ; Brown et al., 2001 ; Silani et al., 2005). Cette méthode permet de mettre en évidence, voxel-par-voxel, des différences morphologiques (volume cortical,

volume de matière blanche, volume de matière grise) d'un groupe de patients comparé à un groupe contrôle.

La matière grise

Une diminution du volume de matière grise a été démontrée chez des dyslexiques au niveau des aires cérébrales associées à la lecture (Brown et al., 2001 ; Silani et al., 2005 ; Vinckenbosch, Robichon, & Eliez, 2005). Brambati et al. (2004) observent une réduction significative du volume de matière grise chez des dyslexiques au niveau des aires fonctionnelles postérieures du réseau neuronal de la lecture. Plus précisément, cette réduction de matière grise a été observée au niveau du planum temporale de façon bilatérale, dans le cortex inféro-temporal, dans les gyri temporaux inférieur et supérieur gauches et dans le gyrus temporal moyen droit ainsi que dans les noyaux cérébelleux. De même, Eckert (2004, 2005) rapporte des différences structurales superposables à des différences fonctionnelles chez un groupe de dyslexiques comparé à un groupe contrôle. Ces différences morphologiques se situent principalement au niveau des régions pariéto-temporale et occipito-temporale, ainsi qu'au niveau du gyrus frontal inférieur et du cervelet.

L'étude en IRM anatomique de Vinckenbosch et al. (2005) précise la localisation de cette réduction de densité de matière grise au niveau des gyri temporaux inférieur et moyen gauches chez le groupe de dyslexiques alors qu'une augmentation de densité de matière grise est observée au niveau du gyrus frontal supérieur droit et dans les deux hémisphères au niveau de la région préfrontale. Les auteurs montrent également, pour l'ensemble des participants (contrôles et dyslexiques), une corrélation entre les performances dans une tâche auditive de jugement de rimes et une proportion plus importante de matière grise dans le gyrus frontal moyen de façon bilatérale. De même, une corrélation entre les performances dans une tâche visuelle de jugement de rimes et l'augmentation de densité de matière grise au niveau des gyri temporaux moyens droit et gauche a été démontrée (voir aussi Leonard et al., 2001).

La matière blanche

Une désorganisation significative de la matière blanche, mise en évidence par la technique *diffusion tensor imaging* (DTI) chez des personnes ayant des difficultés de lecture, pourrait expliquer la réduction des connexions cortico-corticales (Klingberg et al., 2000 ; Niogi & McCandliss, 2006). Klingberg et al. (2000) mettent ainsi en évidence une réduction significative du volume de matière blanche au niveau de la région temporo-pariétale bilatérale chez des faibles lecteurs. Cette atteinte spécifique des régions temporo-pariétales, jouant un

rôle important dans les capacités de lecture, suggère des connexions défaillantes avec les autres régions cérébrales. De plus, les auteurs montrent une orientation précise des axones des neurones concernés par cette anomalie structurale : les projections neuronales provenant des régions temporo-pariétales et se projetant sur les régions frontales sont touchées.

Par ailleurs, les dyslexiques auraient un trouble du transfert des informations entre les deux hémisphères. Le corps calleux est une formation interhémisphérique composée de substance blanche correspondant aux fibres axoniques des connexions interhémisphériques. L'imagerie a permis d'observer des différences de taille du corps calleux entre les dyslexiques et les sujets témoins : le corps calleux apparaît plus épais et plus grand, au niveau de son tiers postérieur, chez les hommes dyslexiques que chez les personnes contrôles (Rumsey et al., 1996). Un grand nombre de cellules nerveuses supplémentaires est donc présent dans cette région cérébrale (pour une revue voir Habib, 2000 ; Hynd et al., 1995). Cette anomalie anatomique reflèterait donc une augmentation des connexions qui pourrait avoir un rôle d'inhibition ou de collaboration interhémisphérique (Habib, 2000).

La communication entre les différents cortex est, par conséquent, affectée et peut être à l'origine d'une mauvaise association entre les codes visuels et les codes phonologiques nécessaires lors de l'apprentissage de la lecture.

4.4.4.2. Imagerie fonctionnelle

Deux études, utilisant deux techniques d'imagerie différentes (la méthode VBM et l'IRM fonctionnelle) ont permis de préciser les relations entre les différences structurales et les différences fonctionnelles observées chez les dyslexiques (Paulesu et al., 2001 ; Silani et al., 2005). Les mêmes groupes ont participé aux deux études successivement. Les résultats ont montré que la réduction du volume de matière grise observée dans les régions temporale et occipitale postérieures gauches (Silani et al., 2005), était liée à une diminution d'activité cérébrale (Paulesu et al., 2001), alors que les réductions de volume de la matière blanche suggèrent un défaut de connexions entre les zones cérébrales impliquées dans le traitement du langage (Silani et al., 2005). Selon une étude de Binder et al. (1997), les gyri temporaux inférieur et moyen joueraient un rôle crucial dans le traitement du langage et dans les processus de lecture. Les mêmes relations anatomo-fonctionnelles sont démontrées au niveau du lobe pariétal inférieur gauche chez des dyslexiques (Hoeft et al., 2007). L'ensemble de ces résultats renforce l'hypothèse selon laquelle les dyslexiques présenteraient des anomalies anatomo-fonctionnelles latéralisées dans les régions de l'hémisphère gauche correspondant aux aires cérébrales dédiées au langage.

Des études ont mis en évidence des différences d'activation cérébrale des aires du langage lors de tâches de reconnaissance de mots et de pseudo-mots entre des dyslexiques et des normo-lecteurs (Simos, Breier, Fletcher, Bergman, & Papanicolaou, 2000 ; Simos et al., 2000). Simos, Breier, Fletcher, Bergman et al. (2000) montrent une activation réduite de la région temporo-pariétale gauche et une augmentation d'activation des régions analogues dans l'hémisphère droit pour une tâche visuelle de reconnaissance de mots chez des enfants dyslexiques comparés à des normo-lecteurs. Des anomalies spatio-temporelles au niveau des connexions fonctionnelles, reliant les différentes régions impliquées dans les processus de traitement de la lecture, empêcheraient une activation simultanée de ces aires dédiées au langage. Par ailleurs, la diminution d'activité au niveau notamment du gyrus temporal supérieur chez les dyslexiques rend compte de leurs difficultés dans les étapes de décodage et d'assemblage phonologiques dont les traitements se font précisément dans cette région cérébrale (Simos et al., 2000). Notons que dans une tâche auditive de reconnaissance de mots, le patron d'activation de ces mêmes aires est totalement atypique chez les dyslexiques. Paulesu et al. (1996) montrent une réduction d'activation des gyri temporaux supérieur, inférieur et moyen gauches. L'absence d'activation au niveau de l'insula renforce l'hypothèse d'une anomalie de connexion entre les aires antérieures et postérieures de la parole. En effet, l'insula formerait un pont entre l'aire de Broca (crucial pour la segmentation phonologique) et le gyrus supramarginal (qui sous-tendrait la mémoire phonologique à court-terme) connectant ainsi les différentes unités de traitement du langage.

Les connexions réciproques entre les régions cérébrales impliquées dans la procédure orthographique (traitement du langage écrit) et celles de la procédure phonologique (traitement du langage oral) permettent aux enfants de construire de nouvelles représentations orthographiques par rapport à leurs représentations phonologiques préexistantes. Ce dysfonctionnement pourrait expliquer une mauvaise ou faible articulation entre les voies phonologiques par assemblage et par adressage. Toutefois, d'autres études montrent l'implication d'une autre région du langage, une zone du lobe pariétal inférieur (cf. Chapitre 1) jouant également un rôle dans le traitement phonologique (Paulesu et al., 1996 ; Rumsey et al., 1999 ; Shaywitz et al., 1998).

L'hypothèse d'une anomalie de connexion entre les aires antérieures et postérieures du langage (Paulesu et al., 1996) est maintenant appuyée par un modèle animal, chez le rat (voir aussi Ramus, 2006 ; Rosen, Burstein, & Galaburda, 2000) et par les résultats de Klingberg et al. (2000) qui montrent des anomalies structurales au niveau notamment du faisceau arqué. Chez le rat, Herman, Galaburda, Fitch, Carter et Rosen (1997) mettent en évidence des

changements de connexions suite à la présence de microgyri dans les noyaux géniculés médians corrélées à une baisse des performances dans une tâche de discrimination auditive. Rosen (2000) dans la région périsylvienne gauche, ce qui peut expliquer le trouble phonologique.

Pour résumer, l'ensemble des études et l'apport des techniques d'imagerie cérébrale permettent aujourd'hui de dire qu'une désorganisation et qu'un dysfonctionnement des aires cérébrales impliquées dans le traitement phonologique et les aspects de décodage de la lecture seraient des causes majeures des troubles observés chez les personnes dyslexiques. Plus précisément, les difficultés en lecture et dans des tâches de conscience phonologique suggèrent un mauvais fonctionnement des réseaux temporo-pariétal et frontal distribués dans les aires du langage.

4.5. Problématique et Hypothèses

Reed (1989) démontre que les difficultés de jugement d'ordre temporel chez les faibles lecteurs sont dues à un déficit perceptuel basique plutôt qu'à un problème de rétention en mémoire de l'ordre temporel. Ce déficit perceptuel correspondrait, selon les travaux de Paula Tallal (1980a), à une difficulté de traitement temporel d'indices acoustiques brefs et/ou rapides. Tallal and Piercy (1974) montrent que des enfants aphasiques présentent de telles difficultés à discriminer des sons de parole qui se distinguent par un changement de fréquence rapide dans la transition CV (/ba-/ga/). Les enfants avec des troubles du langage perçoivent mal certains sons de parole proches acoustiquement. Tallal et Stark (1981) montrent que les enfants ayant des troubles d'apprentissage de la lecture ont des déficits de perception des stimuli de parole lorsque ceux-ci diffèrent uniquement par des indices brefs (/ba-/da/) alors que des sons de parole avec des indices plus longs sont bien perçus (les voyelles).

Parmi les traits phonétiques composant les consonnes occlusives, il apparaît que deux traits sont particulièrement vulnérables à de telles difficultés perceptives.

Le premier est le voisement dont la dimension acoustique critique est temporelle. De nombreuses études ont mis en évidence des difficultés de discrimination du contraste voisé/non voisé chez les dyslexiques : /da-/ta/ (Tallal & Stark, 1981) ou /ba-/pa/ (Elliott, Hammer, & Scholl, 1989). Les études de Bedoin et ses collaborateurs (Bedoin, 2003 ; Dworzak, Bedoin, & Krifi, sous presse ; Krifi, Bedoin, & Mérigot, 2003) ont montré une organisation phonétique des unités phonémiques différente chez des enfants dyslexiques, avec notamment une absence de prise en compte du trait de voisement dans cette architecture. Suite à ces études, les auteurs ont évalué l'effet d'un entraînement audio-visuel sur la sensibilité au trait de voisement en lecture chez les enfants dyslexiques. L'entraînement est bénéfique et contribuerait à la mise en place progressive du système d'organisation des phonèmes. Le but principal est de développer des représentations phonologiques plus détaillées et précises du point de vue phonétique (Fabre & Bedoin, 2003). Plus récemment, Bedoin et Krifi (à paraître) suggèrent que les représentations du lieu et du mode d'articulation sont plus précises que celle du trait de voisement.

Le second correspond au lieu d'articulation dont la dimension critique peut être de deux natures différentes : spectrale et temporelle. De nombreuses études ont étudié ce trait phonétique (Bradlow et al., 1999 ; Forrest & Morrisette, 1999 ; Merzenich et al., 1996 ; Tallal et al., 1996 ; Tallal & Piercy, 1974). Tallal et Piercy (1974, 1975) montrent que les enfants

aphasiques ont des difficultés de discrimination de la paire /ba-/da/ avec de courtes durées de transitions formantiques (43 ms) ce qui n'est pas le cas lorsque les transitions formantiques sont plus longues (95 ms). L'allongement de la durée de la transition permet donc d'améliorer la perception des sons de parole du fait de l'augmentation du temps disponible pour le traitement d'indices acoustiques rapides mais particulièrement cruciaux. Plus récemment, Tallal et al. (1996) et Merzenich et al. (1996) ont procédé à l'entraînement d'enfants ayant des troubles du langage en utilisant de la parole modifiée. Cette parole contenait des éléments transitionnels rapides allongés et amplifiés, ce qui améliora la perception de la parole par les enfants. Cependant, Mody et al. (1997) considèrent que cette amélioration est due essentiellement à l'augmentation de la distance phonétique entre le contraste /ba-/da/. Les auteurs suggèrent donc que cet effet d'entraînement est spécifique à la parole car il porte sur des caractéristiques linguistiques des stimuli et qu'il n'est donc pas dû directement à un temps d'encodage temporel, donc la théorie du déficit auditif du traitement temporel est rejetée.

Bradlow et al. (1999) explorent les indices acoustiques précis des consonnes occlusives qui poseraient des difficultés de perception aux enfants ayant des troubles d'apprentissage de la lecture (Learning Problem, LP). Les auteurs font varier la durée des transitions formantiques sur un continuum /da-/ga/. Lorsqu'ils allongent la durée de la transition de 40 ms à 80 ms, ils n'observent pas d'amélioration des seuils de discrimination. Par contre, ils observent au niveau de la réponse électrophysiologique une diminution de la *mismatch negativity* (MMN) chez le groupe LP pour le contraste /da-/ga/ lorsque la durée de la transition est de 40 ms. Par ailleurs, pour une durée de 80 ms, ils observent la même réponse MMN pour les deux groupes. L'allongement de la durée de la transition formantique permet donc la disparition d'anomalies de l'encodage à un niveau pré-attentionnel. Cependant, cet allongement n'est pas suffisant pour faciliter la discrimination du contraste de lieu d'articulation au niveau comportemental. Par conséquent, cette étude suggère que le traitement d'indices acoustiques brefs et rapides ne serait pas un problème fondamental chez les dyslexiques. Kraus et al. (1996) mettent en évidence la nécessité, pour les enfants LP, d'une distance acoustique importante pour arriver à discriminer deux sons de parole. Certains enfants LP présentent des difficultés pour discriminer la paire /da-/ga/ (même durée de transition), alors qu'ils ne présentent pas de déficit pour distinguer le contraste /ba-/wa/ (durée de transition plus longue pour /wa/, 75 à 150 ms comparé à 50 à 75 ms pour l'occlusive). Ces résultats comportementaux sont corrélés avec la réponse électrophysiologique, la MMN, qui n'apparaît pas pour le contraste /da-/ga/ chez les enfants

qui n'arrivent pas à les discriminer. La durée de transition est donc un indice critique pour discriminer deux phonèmes. Ces résultats montrent que les difficultés perceptuelles des enfants LP ont lieu avant la perception consciente lors de traitements perceptifs de bas niveau. Les changements spectro-temporels ne sont pas traités de la même manière pour tous les enfants LP, dans leur ensemble, donc les informations seraient traitées par des mécanismes moins efficaces le long des voies auditives ascendantes.

La question de l'identification et de la discrimination de phonèmes chez les dyslexiques reste encore à explorer pour décrire plus précisément les indices acoustiques responsables de cette conscience phonologique défaillante. Nous nous demandons si la difficulté des dyslexiques à manipuler et à distinguer les différents sons du langage ne pourrait être liée à un problème de bas niveau. Des troubles d'extraction de traits acoustiques composants les phonèmes empêcheraient leur manipulation et leur représentation. L'objectif de ce travail est d'étudier des traits phonétiques de consonnes occlusives qui induiraient des difficultés de perception phonémique chez des adultes dyslexiques. Nous voudrions ainsi étudier l'hypothèse d'un déficit d'un traitement auditif temporel chez les dyslexiques adultes. Nous ne pourrions cependant pas répondre à la question directement à savoir si le déficit perceptuel chez les dyslexiques est de nature auditive ou spécifique à la parole. Mais, en nous focalisant sur des indices acoustiques de la parole, nous pourrions apporter des informations sur la nature du déficit perceptuel, en particulier dans la perception de la parole. Nous nous posons la question de l'effet de la compression de la durée d'indices acoustiques brefs, nécessaires à la perception de la parole, sur l'identification de stimuli de parole chez des dyslexiques adultes. La réduction de durée du trait de voisement et de celui du lieu d'articulation de consonnes occlusives influencera-t-elle l'identification et la discrimination de ces consonnes chez des dyslexiques adultes, de manière plus forte que chez des individus contrôles ?

Nous comparons les performances des dyslexiques avec les performances de sujets appariés ne présentant pas de trouble de la lecture. Les Expériences 1 et 2 présentées dans le Chapitre 2 sont proposées aux deux groupes. Rappelons que l'Expérience 1 porte sur la compression temporelle du trait de voisement alors que dans l'Expérience 2 c'est le trait de lieu d'articulation qui est manipulé. Nous émettons l'hypothèse générale selon laquelle la compression temporelle des deux traits phonétiques, indépendamment l'un de l'autre, chez les dyslexiques devrait avoir un effet sur l'intelligibilité de la parole. Nous nous attendons donc à

observer des performances d'identification des consonnes significativement différentes entre les deux groupes. Les résultats devraient nous renseigner sur la nature des traits acoustico-phonétiques dont la brièveté provoque des difficultés perceptuelles chez les dyslexiques. Les consonnes occlusives proposées constituent un « point faible » chez de nombreux dyslexiques, aussi bien au niveau de la production, de la perception que de l'écriture. Nous observerons la nature des erreurs des dyslexiques dans une tâche d'identification auditive de pseudo-mots de forme CVCV.

Les hypothèses opérationnelles sont les suivantes :

- Dans une condition dite naturelle correspondant aux durées initiales des indices acoustiques, nous nous attendons à observer une diminution des performances d'identification des phonèmes dans des pseudo-mots chez les dyslexiques.
- La réduction de durée des indices acoustiques induira une perte d'intelligibilité plus importante chez les dyslexiques que chez les contrôles, du fait de leurs difficultés de traitement temporel de segments auditifs brefs.
- Comme nous l'avons mentionné dans la problématique, nous émettons l'hypothèse selon laquelle les dyslexiques seraient plus sensibles au trait de voisement qu'au trait de lieu d'articulation. Par conséquent, nous devrions observer une baisse des performances d'identification des pseudo-mots plus importante dans l'Expérience 1 lorsque le trait de voisement est manipulé que dans l'Expérience 2.
- Nous suggérons que la nature acoustique des indices pourrait expliquer ce traitement différentiel chez les dyslexiques. Le trait de voisement est un indice temporel alors que les transitions formantiques seraient des indices spectro-temporels, par conséquent, les transitions seraient plus robustes à la modification temporelle. Les informations spectrales seraient traitées correctement par les dyslexiques. Les performances d'identification du lieu d'articulation des phonèmes ne devraient pas être sensibles à la réduction temporelle des transitions.
- Dans les deux expériences, l'analyse des erreurs faites par les deux groupes devraient également rendre compte du déficit de traitement auditif temporel chez les dyslexiques par rapport aux normo-lecteurs.

4.6. Expérience 1 : Compression temporelle du trait de voisement

4.6.1. Méthode

4.6.1.1. Participants

Trente-deux dyslexiques adultes, âgés de 18 à 35 ans (12 hommes, moyenne d'âge = 23.3, écart-type = 5.5), ont participé à cette expérience. Les dyslexiques ont été appariés en âge, en sexe et en latéralité manuelle (5 gauchers) à un groupe contrôle de trente-deux participants, sans trouble de langage (normo-lecteurs), âgés de 18 à 39 ans (12 hommes, moyenne d'âge = 23.2, écart-type = 5.8). Aucune différence d'âge significative entre les deux groupes n'a été mise en évidence ($p = 0.84$). Bien entendu, les sujets contrôles ont rapporté ne jamais avoir eu de trouble du langage ou neurologique, ni de déficit auditif. Les seuils auditifs des dyslexiques ont été mesurés, par une audiométrie tonale, afin de s'assurer qu'ils étaient inférieurs ou égaux à 20 dB HL pour les fréquences suivantes : 0.25, 0.5, 1, 2, 4 et 8 kHz. Tous les participants avaient le français pour langue maternelle. La dyslexie des participants a été au préalable diagnostiquée par un orthophoniste ou un neuropsychologue. Leur dernier diagnostic est ultérieur à leur majorité. Il y avait 27 dyslexiques phonologiques et 5 qui ne présentaient pas de trouble phonologique. Nous avons récupéré tous les diagnostics établis, cependant, afin d'homogénéiser les données du groupe, nous avons effectué un test français de dépistage rapide de la dyslexie (l'ODÉDYS créé par Jacquier-Roux, Valdois, & Zorman, 2002).

4.6.1.2. Évaluation Neuropsychologique des participants dyslexiques

Outre ce test de dépistage rapide de la dyslexie (l'ODÉDYS), la batterie de tests comportait un test de lecture (l'Alouette, Lefavrais, 1967), un test d'intelligence (les matrices progressives standard de Raven, Raven, 1938) et nous terminions par un entretien avec le participant pour recueillir le plus d'informations possibles au sujet de sa dyslexie.

Le test de lecture : l'Alouette

Tout examen des capacités de lecture nécessite une estimation du niveau général de lecture grâce à un test normé. L'Alouette (Lefavrais, 1967) est un test utilisé de manière quasi systématique dans les bilans neuropsychologiques pour détecter un retard d'apprentissage de

la lecture. Son étalonnage a été effectué sur 800 enfants français, de 6 à 14 ans, ainsi que sur des adultes. L'Alouette est un test de lecture à haute voix d'un texte de 265 mots, qui doit être lu en un temps limité de trois minutes (cf. Annexe 2). Le nombre d'erreurs, les mots non lus et le temps de lecture (s'il est inférieur à 3 minutes) sont notés. L'objectif de ce test est d'attribuer un niveau de lecture (ou âge lexique) correspondant à la précision et à la rapidité de la lecture à haute voix. Le texte est peu porteur de sens et contient des mots peu fréquents auxquels l'enfant n'est pas habituellement confronté. L'enfant ne peut donc pas utiliser d'informations contextuelles ni s'aider du sens global du texte pour deviner les mots, seules ces capacités de décodage lui sont utiles. Un retard en lecture d'au moins 18 mois (écart entre l'âge réel et l'âge lexique) permet d'évoquer un diagnostic de dyslexie. Toutefois, l'Alouette étant un test de leximétrie, sa passation ne renseigne pas sur la nature des difficultés, ni sur les causes possibles de dysfonctionnement. Par conséquent, nous chercherons à qualifier la pathologie plus précisément grâce à une batterie de tests complémentaires que nous allons présenter maintenant.

L'Outil de DÉpistage de la DYSlexie : ODÉDYS version 1

L'ODÉDYS est un outil issu d'une batterie de test : le Bilan Analytique du Langage Écrit, le BALE (Jacquier-Roux, Valdois, & Zorman, 2002). Le BALE permet de faire un diagnostic précis de l'intensité et du type de dyslexie. Il comporte 40 épreuves couvrant la plupart des fonctions (mémoire, traitements visuels, capacités métaphonologiques, orthographe, lecture). Le temps d'évaluation total du BALE varie entre 2 et 4 heures. L'ODÉDYS n'en retient que quelques épreuves, rendant ainsi la passation beaucoup plus rapide, 20 à 30 minutes. Cet outil comprend 8 épreuves : 1 épreuve permettant de connaître l'âge lexique qui vient d'être présentée (l'Alouette), 1 épreuve de lecture, 1 épreuve d'orthographe, 2 épreuves métaphonologiques, 1 épreuve de mémoire verbale à court terme et 2 épreuves de traitement visuel.

- *L'épreuve de lecture* est composée de 3 listes : 20 mots irréguliers, 20 mots réguliers et 20 pseudo-mots. Ces listes permettent d'évaluer les différentes procédures de lecture. Le sujet doit lire chaque liste l'une après l'autre en faisant le moins d'erreurs possible et le plus rapidement possible. Ainsi la nature des erreurs, le temps de lecture et le score sont relevées par l'examineur.
- *L'épreuve d'orthographe* correspond à une dictée de mots divisée en 3 listes de 10 items chacune : des mots irréguliers, réguliers et des pseudo-mots. Cette épreuve permet d'analyser les procédures analytique et lexicale d'écriture.

- Les deux *épreuves métaphonologiques* permettent d'estimer le niveau de conscience phonémique du sujet. Elles rendent nécessaire la manipulation de phonèmes : la première est *une épreuve de suppression du phonème initial* et la seconde est *une épreuve d'acronyme* (fusion de phonèmes). La première épreuve requiert l'extraction du premier phonème d'un mot prononcé par l'examineur (p.ex. [kan] -> [an]). La plupart des stimuli commence par un groupe consonantique (p.ex. [flu] -> [lu], [tru] -> [ru]). Cet exercice est particulièrement difficile pour les dyslexiques qui ont un trouble de la conscience phonémique, ils ont tendance à supprimer la totalité du groupe consonantique (p.ex. [flu] -> [u]). Pour la seconde épreuve, le sujet doit isoler le premier phonème de chacun des deux mots énoncés par l'examineur puis les fusionner pour créer une syllabe (p.ex. [ʃjẽ] et [akrupi] -> [ʃa]). Différents types d'erreurs peuvent être observés, par exemple le sujet va extraire le première lettre à la place du phonème ([ka] dans l'exemple précédent).
- *L'épreuve de mémoire verbale à court terme* correspond à une épreuve d'empan de chiffres à l'endroit : le nombre maximal de chiffres énoncés que le sujet peut répéter détermine sa capacité de mémoire verbale à court terme. Par ailleurs, le nombre maximal de chiffres que le sujet peut répéter dans l'ordre inverse (empan envers) rend compte de ses capacités de mémoire de travail.
- Pour finir, deux *épreuves visuelles* font partie du test : *une épreuve de comparaison de séquences de lettres sans signification* et *le test des cloches* (Gauthier, Dehaut, & Joannette, 1989). La première épreuve visuelle comporte une liste de 20 paires de séquences lettres que le sujet doit comparer deux à deux pour déterminer si elles sont identiques ou différentes. Le test des cloches permet d'évaluer les capacités visuo-attentionnelles des sujets dans le cadre d'une épreuve de recherche de cibles parmi des distracteurs. Une feuille composée de 112 dessins d'objets (p.ex. des scies, des pommes, des chevaux) dont 35 cloches est présentée au sujet qui doit, en 2 minutes maximum, barrer le plus de cloches possible. Le score ainsi que la stratégie de balayage visuel sont notés.

La diminution du nombre d'épreuves par rapport au BALE rend cet outil incomplet et ne permet pas d'établir avec certitude le type de dyslexie. Le problème est que les capacités attentionnelles et l'efficacité intellectuelle des enfants ne sont pas estimées par l'ODÉDYS, empêchant ainsi de faire un diagnostic différentiel entre une dyslexie et un retard de lecture d'une autre nature. Dans notre étude, nous avons donc utilisé les matrices progressives

standard de Raven pour mesurer les capacités intellectuelles de nos participants (Raven, 1938) afin d'écarter une explication des difficultés en lecture par un retard mental. Cependant, la passation de l'ODÉDYS permet de mettre en exergue des difficultés relevant davantage d'un dysfonctionnement de la procédure lexicale ou analytique de lecture et d'écriture. Les épreuves qui le composent et l'étalonnage sont ceux issus du BALE. Les épreuves du BALE ont été étalonnées auprès d'enfants du CE1 au CM2. Pour le niveau 5^{ème} de collège, un étalonnage supplémentaire a été effectué en 2005 (cf. version 2 de l'ODÉDYS, Jacquier-Roux, Valdois, Zorman, Lequette, & Pouget, 2005) sur 129 élèves n'ayant jamais redoublé. Nous utiliserons les données de ce dernier étalonnage pour les adultes dyslexiques que nous étudierons dans les Chapitres 4 et 5. En effet, le niveau 5^{ème} de collège est le plus haut niveau scolaire, à notre disposition, pour lequel nous ayons un étalonnage.

Les matrices progressives standard de Raven

Parmi toute la batterie de tests effectuée par les patients, l'un des premiers est un test d'intelligence permettant d'écarter toute déficience intellectuelle qui, si elle est prouvée, écarte automatiquement le diagnostic de dyslexie. Les Matrices progressives standard de Raven constituent un test d'intelligence non verbal très utilisé en clinique et assez adapté aux personnes dyslexiques en raison de l'absence de stimuli verbaux. Les Matrices sont composées de 5 séries (A, B, C, D et E) de 12 essais à choix multiples demandant un raisonnement abstrait (cf. Annexe 3). Ces matrices progressives standard tendent à mesurer les capacités à former des relations perceptuelles et à réaliser des raisonnements par analogie indépendamment du langage et de l'apprentissage scolaire. Les participants doivent identifier le segment manquant parmi 6 ou 8 choix possibles en trouvant la bonne logique, une seule pièce proposée étant adéquate. Les séries sont de plus en plus difficiles et le principe logique pour retrouver la pièce manquante change de série en série. Ce test est valide pour des enfants à partir de 6 ans jusqu'à l'âge adulte. Le score obtenu est exprimé en rang percentile grâce à un tableau de normes. L'un des critères pour définir la dyslexie est l'absence de déficit intellectuel. Aussi, un résultat à ce test inférieur à 70 permet d'éliminer le diagnostic de dyslexie. Ce test ne permet pas une mesure du Quotient Intellectuel (QI) des sujets, son objectif est une évaluation rapide de ce QI. Il est important de noter que la pertinence de mesure du QI, pour diagnostiquer la dyslexie, ne fait pas l'unanimité (McDougall & Ellis, 1994, cité par Beaton, McDougall, & Singleton, 1997) aussi bien chez l'enfant que chez l'adulte. En effet, nous pouvons penser que si la personne dyslexique a poursuivi ses études après le BEPC, elle doit avoir des capacités intellectuelles dans la norme.

L'anamnèse

L'anamnèse est une étape importante dans l'établissement du diagnostic de dyslexie. En effet, l'objectif est de recueillir le maximum d'informations sur le patient susceptibles d'orienter le diagnostic sur un type précis de dyslexie. Une description précise et détaillée des symptômes du patient, de l'histoire familiale et des raisons de sa venue en consultation sont des informations complémentaires importantes pour rendre un diagnostic fiable.

Tableau 17 : Résultats des tests psychométriques des dyslexiques dans les Expériences 1 et 2. L'écart-type est entre parenthèses (σ).

			Expérience 1	Expérience 2
			N = 32	N = 32
			Moyenne (σ)	Moyenne (σ)
L'Alouette	Âge lexique		11 ; 6	11 ; 4
	Fautes		12.3 (8.2)	11.6 (8.3)
	Temps (s)		128.7 (23.5)	130.5 (25.6)
Lecture	Mots irréguliers	Score (/20)	18.5 (2.4)	18.4 (2.4)
		Temps (s)	18.7 (7.8)	20.3 (11)
	Mots réguliers	Score (/20)	18.8 (1.9)	18.8 (1.9)
		Temps (s)	20.2 (8.3)	21.5 (10.3)
	Pseudo-Mots	Score (/20)	15.5 (3.1)	15.9 (2.9)
		Temps (s)	28.4 (9)	29.7 (11.3)
Dictée	Mots irréguliers	Score (/10)	8.6 (1.5)	8.6 (1.5)
	Mots réguliers	Score (/10)	9.5 (0.7)	9.5 (0.7)
	Pseudo-Mots	Score (/10)	9.2 (1.4)	9.3 (1.4)
Conscience Phonologique	Suppression de phonèmes initiaux	Score (/10)	8.1 (2.2)	8.3 (2)
	Fusion de phonèmes	Score (/10)	7.3 (2.7)	7.7 (2.4)
Mémoire de travail	Empan endroit		6.1 (1.4)	6.1 (1.3)
	Empan envers		4.5 (1.1)	4.5 (1)
Tâches visuelles	Séquence de lettres	Score (/20)	19.1 (1.1)	19.1 (1.1)
		Temps (s)	44.2 (20.5)	45.9 (21.1)
	Cloches	Score (/35)	33.8 (1.1)	33.7 (1.1)
		Temps (s)	111.7 (12.7)	112.7 (12.6)
Matrices de Raven		Score (/60)	48.6 (7.1)	48.5 (7)

4.6.2. Résultats : Comparaison des dyslexiques et des normo-lecteurs

Les réponses des participants sont traitées de la même manière que dans le Chapitre 2, les données recueillies correspondent au taux d'identification correcte des phonèmes constituant les pseudo-mots de forme CVCV et au taux d'identification correcte du pseudo-mot entier.

Le test t pour des échantillons indépendants correspondant aux deux groupes appariés (NL et DL) permet de comparer les moyennes pour les phonèmes (C₁, V₁, C₂ et V₂) et pour les non-mots (CVCV). Une différence significative a été observée entre les deux groupes pour les

consonnes (C_1 : $t_{32} = 4.6$; $p < .001$ et C_2 : $t_{32} = 2.6$; $p < .05$) et pour les pseudo-mots ($t_{32} = 4.0$; $p < .001$) mais pas pour les voyelles (V_1 : $t_{32} = 0.97$; $p = 0.34$ et V_2 : $t_{32} = 1.6$; $p = 0.11$). Les DL ont des performances plus basses que les NL pour les consonnes d'attaque, les consonnes intervocaliques et les pseudo-mots (Tableau 18).

Tableau 18 : Pourcentages d'identification correcte des phonèmes et des pseudo-mots (%) pour les normo-lecteurs (NL) et les dyslexiques (DL). L'écart-type est entre parenthèses (σ).

	C1	V1	C2	V2	CVCV
NL	88.8 (4)	99.7 (0.8)	90 (5)	99.9 (0.5)	79.9 (6.7)
DL	80.8 (8.4)	99.4 (1.4)	86 (6.1)	99.6 (0.9)	70.7 (9.6)

4.6.2.1. Analyse de la variance (ANOVA)

Ensuite, uniquement les taux d'identification des consonnes seront analysés dans une ANOVA à trois facteurs incluant les facteurs Groupe (NL, DL), la Position de la consonne (C_1 , C_2) et le taux de Compression (100, 50, 25 et 0%). Cette analyse montre que les trois effets principaux sont significatifs [Groupe : $F(1,31) = 22.42$; $p < .001$; Position : $F(1,31) = 17.13$; $p < .001$; taux de Compression : $F(3,93) = 375.40$; $p < .001$]. Globalement, le groupe NL a un taux d'identification correcte plus élevé que le groupe DL (89.4 vs. 83.5%). La consonne intervocalique est mieux identifiée que la consonne en attaque (88 vs. 84.9%). Le test Newman-Keuls de comparaison à posteriori a permis de montrer que les performances ne sont pas significativement différentes pour les taux de compression 100 et 50% (96.3 vs. 95.1% ; $p = 0.28$) alors qu'aux taux de compression 25% et lorsque le trait de voisement est supprimé (0%), les performances diminuent significativement (89.8 et 64.6%). Toutes les comparaisons sont significativement différentes ($p < .001$). L'interaction entre les facteurs Position et taux de Compression est significative [$F(3,93) = 3.68$; $p < .05$] alors que l'interaction entre les facteurs Groupe et Position est proche de la significativité [$F(1,31) = 3.97$; $p = 0.055$]. D'une part, le test Newman-Keuls de comparaison à posteriori met en évidence que la consonne intervocalique est mieux identifiée que la consonne en attaque aux taux de compression 100% et 50% (100% : 98.5 vs. 94%, $p < .01$; 50% : 98 vs. 92.2%, $p < .001$). D'autre part, le test Newman-Keuls de comparaison à posteriori entre les facteurs Groupe et Position montre une absence de différence entre les Positions pour le groupe NL ($C_1 = 88.8$ et $C_2 = 89.9\%$, $p = 0.44$) alors que les taux d'identification correcte pour la consonne intervocalique sont plus importants que ceux pour la consonne d'attaque

pour le groupe DL (C2 = 86.1 et C1 = 81%, $p < .01$). La Figure 50 montre une diminution des performances plus significative en position d'attaque pour les dyslexiques que pour les normo-lecteurs d'où cette interaction et la baisse dans la condition naturelle.

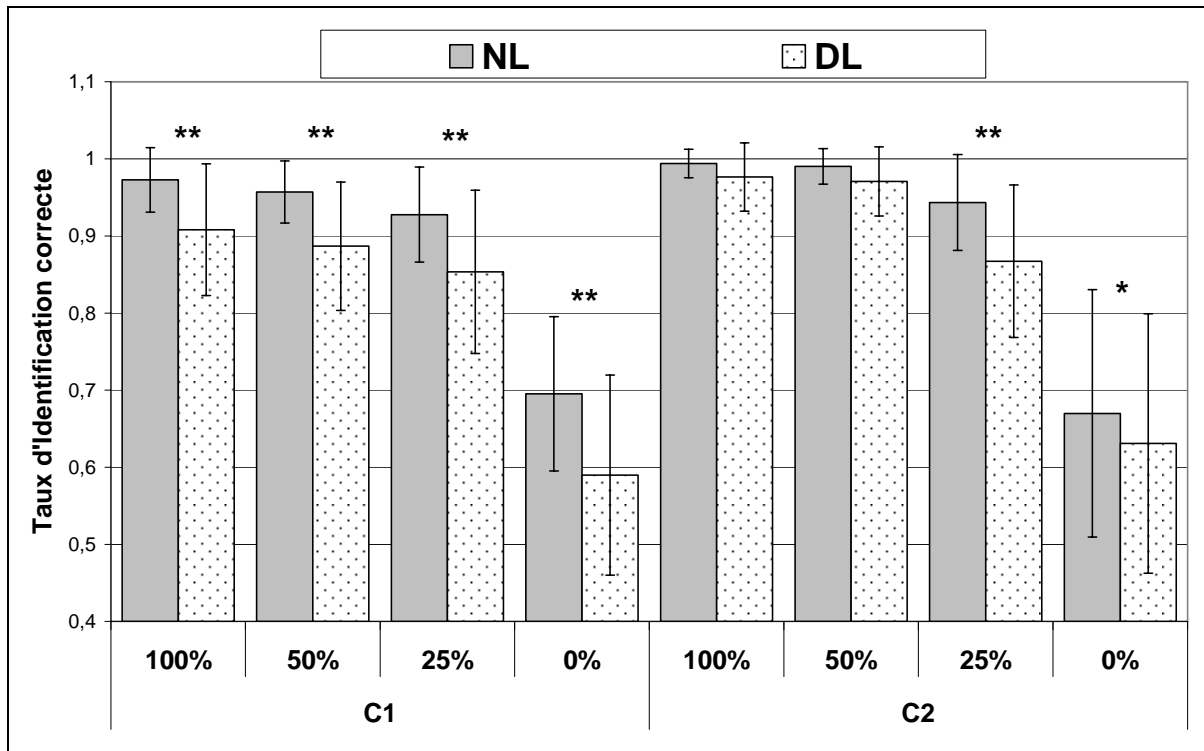


Figure 50 : Taux d'identification correcte des consonnes selon la position (C1 et C2) et selon les taux de compression (100%, 50%, 25% et 0%), pour les normo-lecteurs (NL) et les dyslexiques (DL). Résultats de l'interaction triple Groupe*Position*taux de Compression de l'ANOVA : * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.

Dans la suite des analyses, nous allons nous intéresser aux effets de nos conditions expérimentales sur le trait phonétique manipulé, ici le voisement. Comme dans le Chapitre 2, nous allons analyser séparément les consonnes occlusives voisées et les consonnes occlusives non voisées car pour ces deux types de consonnes, nous ne manipulons pas les mêmes segments. En effet, pour les occlusives voisées, nous compressons la durée de la barre de voisement alors que pour les consonnes occlusives non voisées, nous manipulons le VOT.

Les occlusives voisées

Une ANOVA à trois facteurs : le Groupe (NL, DL), la Position de la consonne (C1, C2) et le taux de Compression (100, 50, 25 et 0%) montre un effet principal pour les trois facteurs [Groupe : $F(1,31) = 15.39$, $p < .001$; Position : $F(1,31) = 49.54$, $p < .001$; taux de Compression : $F(3,93) = 225.40$, $p < .001$]. Le groupe NL est meilleur pour l'identification des occlusives voisées que le groupe DL (91.2% vs. 83.9%). Les occlusives voisées sont

mieux identifiées en position d'attaque qu'en position intervocalique (91.7% vs. 83.4%). La condition de compression à 50% n'a pas d'effet significatif sur l'identification du stimulus (Condition naturelle = 95.6% vs. Compression 50% = 96.8%) alors qu'il y a une différence significative pour la condition de compression à 25% où les performances commencent à chuter (90.6%, $p < .001$). L'identification diminue davantage lorsque l'indice est supprimé (67.3%, $p < .001$). L'effet d'interaction entre les facteurs Position et taux de Compression est également significatif [$F(3,93) = 55.91$, $p < .001$]. Un test de Newman-Keuls de comparaison à postériori précise qu'en position d'attaque, nous n'observons pas d'effet des taux de compression mais uniquement un effet de la suppression de l'indice sur les performances des participants. Au contraire, en position intervocalique, nous observons un effet du taux de compression à 25% et un effet de la suppression de l'indice. Bien que l'interaction triple Groupe*Position*taux de Compression ne soit pas significative, nous avons regardé les comparaisons grâce au test de Newman-Keuls. En position d'attaque, nous observons une différence significative entre les deux groupes pour la condition naturelle (100%) : les NL sont plus performants en condition naturelle que les DL (98.8% vs. 89.5%, $p < .05$). Même chose, lorsque l'indice est supprimé : les NL sont plus performants que les DL (89.5% vs. 75%, $p < .001$). En position intervocalique, nous observons une différence significative entre les deux groupes pour la condition de compression à 25% (91.8% vs. 82.2%, $p < .05$) et la condition où l'indice est supprimé (55.9% vs. 49%, $p < .05$). La Figure 51 représente ces différences significatives entre les deux groupes.

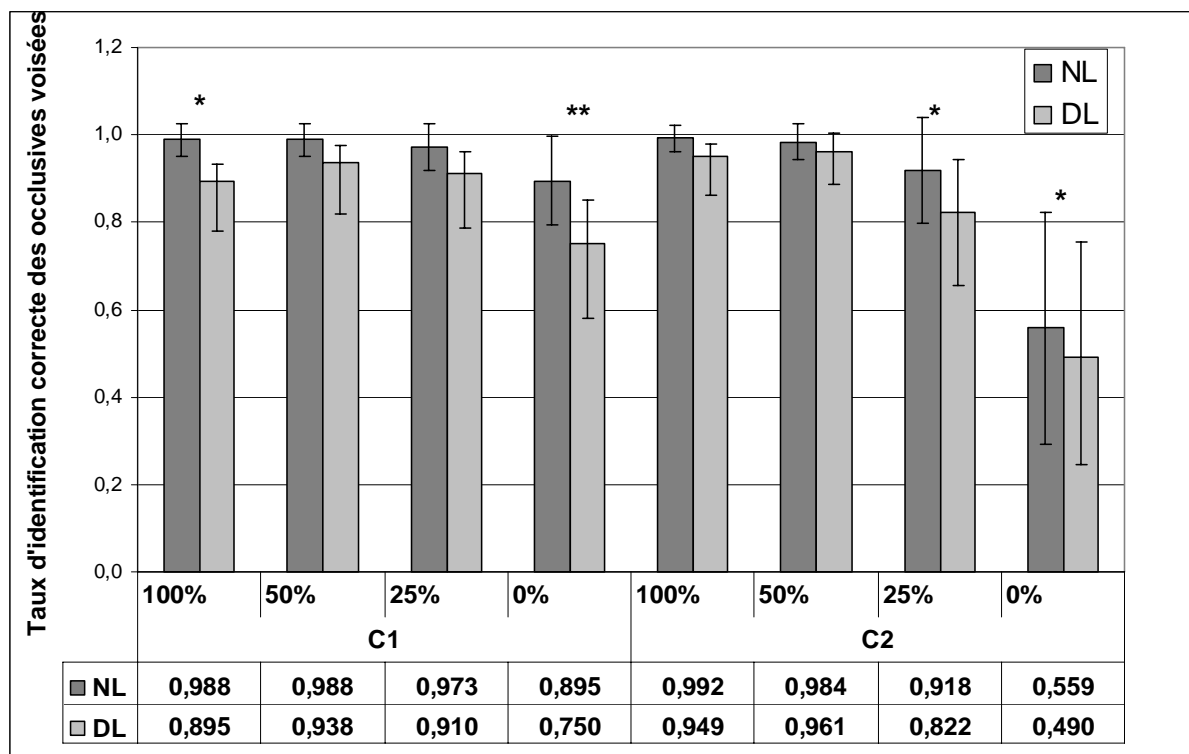


Figure 51 : Taux d'identification correcte des consonnes voisées selon la position (C1 et C2) et selon les taux de compression (100%, 50%, 25% et 0%), pour les normo-lecteurs (NL) et les dyslexiques (DL). Résultats de l'interaction triple Groupe*Position*taux de Compression de l'ANOVA : * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.

Les occlusives non voisées

Une ANOVA à trois facteurs : le Groupe (NL, DL), la Position de la consonne (C1, C2) et le taux de Compression (100, 50, 25 et 0%) montre un effet principal pour les trois facteurs [Groupe : $F(1,31) = 9.09$, $p < .01$; Position : $F(1,31) = 153.77$, $p < .001$; taux de Compression : $F(3,93) = 337.10$, $p < .001$]. Le groupe NL est meilleur pour l'identification des occlusives non voisées que le groupe DL (87.6% vs. 82.9%). Contrairement aux occlusives voisées, les occlusives non voisées sont mieux identifiées en position intervocalique qu'en position d'attaque (92.5% vs. 77.9%). L'effet du taux de Compression apparaît dès 50%, les performances d'identification diminuent progressivement (Condition naturelle = 96.9%, Compression 50% = 93.3%, Compression 25% = 88.7% et Suppression = 62%, $p < .01$ pour toutes les comparaisons). L'effet d'interaction entre les facteurs Position et taux de Compression est également significatif [$F(3,93) = 34.90$, $p < .001$]. Un test de Newman-Keuls de comparaison à postériori précise que l'effet du taux de compression est plus fort en position d'attaque, nous observons une chute des performances dès la condition 50% alors qu'en position intervocalique, les performances d'identification ne diminuent significativement qu'à partir du taux de compression à 25%.

Bien que l'interaction triple Groupe*Position*taux de Compression ne soit pas significative, nous observons les comparaisons grâce au test de Newman-Keuls. En position d'attaque, nous observons une différence significative entre les deux groupes pour les conditions de compression 50% et 25% : les NL sont plus performants que les DL (92.6% vs. 83.6%, $p < .05$; 88.3% vs. 77.7%, $p < .01$). Même chose, lorsque l'indice est supprimé : les NL sont plus performants que les DL (49.6% vs. 43.4%, $p < .05$). En position intervocalique, nous n'observons aucune différence significative entre les deux groupes (Figure 52).

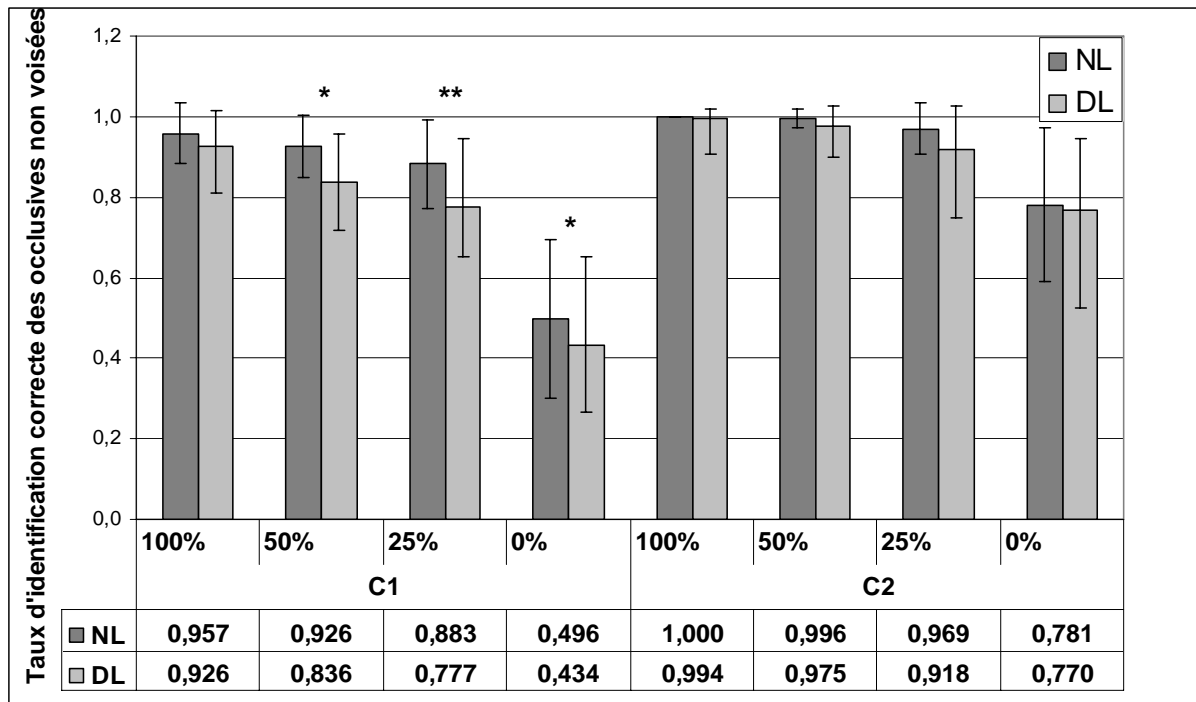


Figure 52 : Taux d'identification correcte des consonnes non voisées selon la position (C1 et C2) et selon les taux de compression (100%, 50%, 25% et 0%), pour les normo-lecteurs (NL) et les dyslexiques (DL). Résultats de l'interaction triple Groupe*Position*taux de Compression de l'ANOVA : * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.

4.6.2.2. Analyse qualitative des erreurs

Pour tenter d'expliquer ces résultats, nous nous intéressons aux erreurs faites par les participants. Les matrices de confusion des occlusives pour chaque position et pour les deux groupes permettent d'observer la nature des erreurs (Tableau 19-Tableau 22).

Les occlusives voisées

En position d'attaque

Nous observons que dans la condition naturelle (100%), les DL font des erreurs de voisement, ils ont tendance à dévoiser les occlusives voisées comme le /b/ qui est confondu

avec /p/ ou le /d/ qui est identifié comme un /t/ (Tableau 19 et Tableau 20). Par ailleurs, aux conditions de compression 50% et 25%, les erreurs sont peu nombreuses pour les deux groupes et la plupart des erreurs sont des confusions sur le voisement pour les deux groupes. Lorsque le trait est supprimé, les confusions sur le voisement deviennent plus importantes chez les DL que chez les NL. Des confusions sur le lieu d'articulation apparaissent également chez les DL (/b/ -> /d/) ainsi que des omissions (/b/ -> rien).

En position intervocalique

Dans la condition naturelle et au taux de compression à 50%, les participants font peu d'erreurs (Tableau 21 et Tableau 22). Au taux de compression à 25%, l'occlusive voisée /b/ est la plus sensible pour les deux groupes, des confusions sur le lieu d'articulation sont fréquentes : le /b/ est identifié comme un /d/. Ce même type d'erreur peut également être associé à une confusion sur le mode d'articulation : le /b/ est confondu avec /l/ ou /r/. Les DL font plus d'erreurs sur le mode d'articulation et le /d/ est aussi identifié comme un /l/. Lorsque le trait de voisement est supprimé, les confusions avec les liquides sont majoritaires pour le /b/ ainsi que les confusions sur le mode d'articulation pour le /d/. Les deux groupes présentent le même pattern d'erreurs mais les DL font plus d'erreurs.

Les occlusives non voisées

En position d'attaque

Peu d'erreurs sont faites dans la condition naturelle (100%) mais nous pouvons noter quelques confusions sur le lieu d'articulation (/p/ -> /t/ et /t/ -> /p/) légèrement plus nombreuses pour les DL (Tableau 19 et Tableau 20). Pour le taux de compression à 50%, les erreurs les plus fréquentes touchent le /p/ qui est soit omis, soit confondu avec /b/. Des erreurs sur le lieu d'articulation sont présentes également (/p/ -> /t/ ou /t/ -> /p/) surtout chez les DL. Au taux de compression à 25%, des confusions sur le voisement où le /p/ est identifié comme un /b/ sont observées ainsi que le /t/ qui est soit confondu avec un /d/ soit omis. Les DL présentent plus d'erreurs de voisement et d'omissions que les NL. Lorsque le trait de voisement est supprimé, la majorité des consonnes non voisées sont omises mais il reste encore des erreurs sur le lieu d'articulation et des erreurs de voisement pour /t/. L'occlusive alvéolaire non voisée est la plus sensible.

En position intervocalique

De manière générale, l’occlusive alvéolaire non voisée est plus sensible que la bilabiale (Tableau 21 et Tableau 22). En effet, l’occlusive bilabiale non voisée montre une bonne résistance à la compression temporelle en position intervocalique malgré quelques confusions sur le voisement, et ce, pour les deux groupes. Pour l’alvéolaire, nous observons des confusions sur le voisement : /t/ est confondu avec /d/, des confusions sur le lieu d’articulation : /t/ est identifié comme un /p/ et des omissions. Ces erreurs sont plus nombreuses à la compression à 25% pour le groupe DL et deviennent équivalente pour les deux groupes lorsque le trait est supprimé (0%).

Tableau 19 : Matrice de confusion pour la consonne d’attaque pour le Groupe dyslexiques dans l’Expérience 1 (N=128).

Condition		b	d	g	p	t	k	l	f	rien
100%	b	114	3		9					2
	d	3	117	1		6				1
	p		3		117	6				2
	t		2		5	119	2			
50%	b	121	2		4					1
	d	2	119			6				1
	p	9	2		96	5				16
	t		1		8	114				5
25%	b	117	3		6					2
	d	1	120		1	5				1
	p	8			104	5				11
	t	2	10		10	95			1	10
0%	b	90	9		14					15
	d	4	108		2	14				
	p	4	1		61	1			1	60
	t	5	12		23	43		1		44

Tableau 20 : Matrice de confusion pour la consonne d’attaque pour le Groupe contrôles dans l’Expérience 1 (N=128).

Condition		b	d	g	p	t	k	v	m	rien
100%	b	128								
	d		124			4				
	p				122	5				1
	t		1		1	124	2			
50%	b	128								
	d		124	1		2				1
	p	4			116					8
	t		1		4	121				2
25%	b	126	2							
	d		123			5				
	p	2			118	4				4
	t		4		12	108				4
0%	b	109	1		8			1	1	8
	d		118			10				
	p	6			73	1				48
	t	4	12		17	59				36

Tableau 21 : Matrice de confusion pour la consonne intervocalique pour le Groupe dyslexiques dans l'Expérience 1 (N=128).

Condition		b	d	p	t	l	r	f	v	m	rien
100%	b	120	3	4						1	
	d	2	126								
	p			128							
	t			1	127						
50%	b	127		1							
	d		122		1	5					
	p	1		125	1			1			
	t		2		126						
25%	b	95	9	2		14	2		1		5
	d	1	119		1	7					
	p	1		126	1						
	t		11	7	110						
0%	b	42	17	4	1	42	3				19
	d	2	80	1		43	2				
	p	3		121							4
	t	2	17	10	77	1					21

Tableau 22 : Matrice de confusion pour la consonne intervocalique pour le Groupe contrôles dans l'Expérience 1 (N=128).

Condition		b	d	p	t	l	r	rien
100%	b	128						
	d		126		1			1
	p			128				
	t				128			
50%	b	126		1			1	
	d	1	126		1			
	p			128				
	t			1	127			
25%	b	111	5	1		4	5	2
	d		127				1	
	p	1	0	127				
	t		3	4	120			1
0%	b	60	10	6	1	43	3	5
	d		86	1	3	30	7	1
	p	4		121	1			2
	t		24	11	80			13

4.6.3. Discussion

Globalement, dans cette Expérience 1, nous avons mis en évidence une différence significative entre les deux groupes dans l'identification auditive de pseudo-mots et, plus particulièrement, dans le traitement auditif temporel des occlusives. Les dyslexiques montrent de moins bonnes performances dans la discrimination du contraste voisé/non voisé qui pourrait être le reflet d'un trouble du traitement auditif temporel de ce trait phonétique. Cependant, ces déficits apparaissent majoritairement en position d'attaque. Ces effets de compression temporelle chez les dyslexiques dépendent donc de la position de la consonne dans le pseudo-mot ainsi que de la nature du trait manipulé.

4.6.3.1. Les occlusives voisées en position d'attaque

Dans la condition naturelle, nous avons observé une différence entre les deux groupes qui met en évidence un déficit de traitement auditif temporel des occlusives voisées en attaque chez les dyslexiques (diminution de 9.3% des performances par rapport aux normo-lecteurs). Les dyslexiques présentent des difficultés de perception de la barre de voisement pour la condition naturelle (100%) en position d'attaque.

Cependant, ils présentent d'aussi bonnes capacités, que les normo-lecteurs, à identifier les occlusives voisées même lorsque la durée de l'indice de voisement est réduite en position d'attaque. À 50% et 25% de compression, aucune différence significative d'identification n'apparaît entre les deux groupes même si les dyslexiques ont tendance à faire plus d'erreurs que les normo-lecteurs, mais la différence n'est pas significative.

Par contre, lorsque le trait de voisement est supprimé, les dyslexiques sont plus sensibles à l'absence de l'indice acoustique que les normo-lecteurs (baisse de 13.5%). Leur discrimination devient plus difficile. Ils montrent des difficultés à identifier les occlusives voisées lorsque la durée de l'occlusion est supprimée.

L'ensemble de nos résultats ne permettent pas de dire que les dyslexiques ont un trouble spécifique du traitement de la parole compressée. Cependant, nous pouvons affirmer que dans les conditions naturelles, les dyslexiques présentent un déficit perceptuel en attaque pour les occlusives voisées. Ils ont tendance à dévoiser l'occlusive ce qui rend compte d'un trouble de traitement du contraste phonétique voisé/non voisé en attaque. Il est important de remarquer que ce déficit intervient au début du stimulus dans les premières millisecondes de traitement du signal de parole. Nous pouvons suggérer que l'activation des mécanismes de traitement auditif des sons de parole soit retardée chez les dyslexiques. Des études en

électroencéphalographie, qui est une technique avec une très bonne résolution temporelle, devrait pouvoir apporter des éléments de réponse sur l'activité cérébrale dans les premières millisecondes du traitement du signal de parole. Nous reviendrons sur ces études dans la discussion générale.

4.6.3.2. Les occlusives voisées en position intervocalique

Dans la condition naturelle et au taux de compression 50%, aucune différence entre les deux groupes n'est apparue. En intervocalique, à 100%, nous suggérons que la baisse des erreurs de voisement que les DL faisaient en attaque est due au fort contexte vocalique. Les performances sont meilleures en position intervocalique qu'en attaque. Nous suggérons que la durée du voisement à 50% de compression (≈ 40 ms) n'atteint pas une valeur seuil critique pour l'identification (cf. Analyse acoustique du Chapitre 2). Les dyslexiques ne sont pas plus sensibles à la compression temporelle à 50% que les témoins. La durée du voisement permettrait un bon encodage de l'indice et par conséquent, une bonne discrimination de la consonne. Au taux de compression à 25%, les dyslexiques montrent des difficultés d'identification par rapport aux témoins (baisse de 9.6%). La durée du voisement (≈ 20 ms) pourrait atteindre une durée seuil critique pour l'identification des occlusives, dans le contexte intervocalique. Nous avons remarqué que la bilabiale était plus affectée par la compression et que des confusions avec les liquides /l/ et /r/ étaient nombreuses pour toutes les occlusives voisées. La bilabiale serait moins transparente aux effets de coarticulation c'est-à-dire qu'elle ne bénéficierait pas des transferts d'informations des phonèmes adjacents. Par ailleurs, la réduction de la durée de l'occlusion rapproche les deux voyelles, ce qui va créer un fort contexte vocalique en position intervocalique. D'où les confusions avec les liquides qui sont voisées et qui ont une structure formantique proche du contexte vocalique. Lorsque le trait est supprimé, la différence entre les deux groupes est moins importante qu'en attaque (baisse de 6.9%). Les confusions avec les liquides augmentent encore.

4.6.3.3. Les occlusives non voisées en position d'attaque

L'effet de position observé en attaque est plus important pour les occlusives non voisées que pour les occlusives voisées. Nous pouvons imaginer que cela est dû principalement au fait que la durée du VOT des occlusives non voisées est plus courte que celle de la barre de voisement des voisées. Comme nous l'avons suggéré, dans le paragraphe précédent, un traitement auditif temporel défaillant dans les premières millisecondes de l'analyse pourrait en être à l'origine. Donc si la durée est encore plus courte, l'analyse sera plus perturbée.

Nous n'avons pas observé de différence entre les deux groupes en position d'attaque dans la condition naturelle pour les occlusives non voisées, contrairement aux occlusives voisées mais les confusions sur le lieu d'articulation sont plus nombreuses chez les dyslexiques. Par contre, nous observons un effet important de la compression temporelle chez les dyslexiques, ils sont donc sensibles à la réduction de durée du VOT. À la condition de compression à 50% (VOT \approx 10 ms), la durée de l'indice pourrait indiquer une valeur seuil d'extraction de l'indice pour les occlusives non voisées en attaque. De même, pour la condition de compression à 25%, où la durée est encore diminuée de moitié (\approx 5 ms). Lorsque le trait est supprimé, l'identification devient très difficile du fait de la perte d'une quantité importante d'informations. Comparé aux occlusives voisées, le trait de voisement des occlusives non voisées contient des indices acoustiques importants, plus particulièrement le burst qui renseigne sur le lieu d'articulation, d'où le nombre plus important de confusions sur le lieu d'articulation. En attaque, l'auditeur se fie aux indices de relâchement du burst pour les alvéolaires donc si on altère le burst, le /t/ est confondu ou omis. C'est ce que nous avons observé dans notre analyse qualitative des erreurs.

4.6.3.4. Les occlusives non voisées en position intervocalique

Nous n'avons observé aucune différence significative entre les deux groupes. Pourtant, l'analyse qualitative des erreurs met en évidence des confusions de l'occlusive alvéolaire non voisée alors que l'occlusive bilabiale non voisée est plus résistante à la compression temporelle. Dans la condition naturelle et à 50% de compression, les deux groupes font très peu d'erreurs. Nous commençons à voir des différences apparaître à 25% de compression et lorsque le trait est supprimé. Les dyslexiques font plus d'erreurs de voisement que les normo-lecteurs, ils voient l'occlusive alvéolaire non voisée (/t/ -> /d/). Le contexte vocalique en position VCV affecte la perception de l'alvéolaire non voisée.

4.6.3.5. Le contraste voisé/non voisé chez les dyslexiques

Saerens, Serniclaes et Beeckmans (1989) déclarent qu'en français, les occlusives voisées sont mieux identifiées que les occlusives non voisées. Les consonnes voisées subissent moins les effets d'assimilation que les non voisées. De plus, Niyogi & Ramesh (2003), en anglais, rapportent que le VOT est un bon indice temporel pour l'identification de la parole. Dans leur étude, les auteurs mettent en évidence une durée seuil de discrimination de deux stimuli égale à 20 ms. Nous pouvons remarquer que cette durée équivaut à la valeur seuil critique à laquelle nos dyslexiques sont sensibles pour l'identification des occlusives voisées en attaque. De plus,

les auteurs montrent que les confusions se font plus souvent dans le sens d'un dévoisement des occlusives : voisée -> non voisée. Nos sujets dyslexiques présentent ces erreurs de dévoisement, de manière plus importante que les normo-lecteurs, dans la condition naturelle.

Dans cette première expérience, nous avons mis en évidence grâce à la manipulation temporelle du trait de voisement que les dyslexiques ont un déficit perceptuel du contraste de voisement pour les occlusives.

4.7. Expérience 2 : Compression temporelle du trait de lieu d'articulation

4.7.1. Méthode

4.7.1.1. Participants

Trente-deux dyslexiques adultes, âgées de 18 à 35 ans (12 hommes, moyenne d'âge = 23.2, écart-type = 5.6), ont participé à cette expérience. Les dyslexiques ont été appariés en sexe, en âge et en latéralité manuelle (4 gauchers) à un groupe contrôle de trente deux participants, sans trouble de langage, âgés de 19 à 39 ans (12 hommes, moyenne d'âge = 23, écart-type = 5.8). Aucune différence d'âge significative n'est observée entre les 2 groupes ($p = 0.69$). Il y avait 26 dyslexiques phonologiques et 6 qui ne présentaient pas de trouble phonologique. Les résultats des dyslexiques aux tests psychométriques sont présentés dans le Tableau 17.

4.7.2. Résultats

La nature des données et l'analyse des résultats de l'Expérience 2 sont identiques à celles de l'Expérience 1. Un test t pour des échantillons indépendants compare les moyennes des taux d'identification corrects des deux groupes appariés (NL et DL) pour les phonèmes (C₁, V₁, C₂ et V₂) et pour les pseudo-mots (CVCV). Comme pour l'Expérience 1, une différence significative a été observée entre les deux groupes pour les consonnes (C₁ : $t_{32} = 3.5$, $p < .01$ et C₂ : $t_{32} = 2.3$, $p < .05$) et pour les pseudo-mots ($t_{32} = 3.5$, $p < .01$) mais pas pour les voyelles (V₁ : $t_{32} = 0$, $p = 1$ et V₂ : $t_{32} = 1.8$, $p = 0.08$). Les DL ont des performances plus basses que les NL pour les consonnes d'attaque, les consonnes intervocaliques et les pseudo-mots (Tableau 23).

Tableau 23 : Pourcentages d'identification correcte des phonèmes et des pseudo-mots (%) pour les normo-lecteurs (NL) et les dyslexiques (DL). L'écart-type est entre parenthèses (σ).

	C1	V1	C2	V2	CVCV
NL	94.8 (3)	99.9 (0.4)	98.4 (1.7)	100 (0)	93.2 (3.7)
DL	90.3 (7.2)	99.9 (0.4)	97.3 (2.2)	99.9 (0.5)	88.2 (7.4)

Suite aux résultats de l'analyse précédente, nous ne prendrons en compte que les taux d'identification correcte des consonnes pour les analyses suivantes. Une ANOVA à trois facteurs incluant les facteurs Groupe (NL, DL), Position de la consonne (C1, C2) et taux de Compression (100, 50, 25 et 0%) montre que les trois effets principaux sont significatifs [Groupe : $F(1,31) = 12.94$; $p < .01$; Position : $F(1,31) = 53.70$; $p < .001$; taux de Compression : $F(3,93) = 80.04$; $p < .001$]. Globalement, le groupe NL a un taux d'identification plus élevé que le groupe DL (96.6 vs. 93.8%). La consonne intervocalique est mieux identifiée que la consonne en attaque (97.9 vs. 92.6%). Le test Newman-Keuls de comparaison à posteriori a permis de montrer que les performances diminuent significativement à la condition 0% par rapport aux trois autres conditions (100% : 97.5%, 50% : 97.5%, 25% : 96.6% et 0% : 89.3% ; $p < .001$ pour toutes les comparaisons). Les interactions entre les facteurs Groupe et Position et entre les facteurs Position et Taux de compression sont significatives [$F(1,31) = 8.23$; $p < .01$ et $F(3,93) = 35.20$; $p < .001$]. Le test Newman-Keuls de comparaison à posteriori a été utilisé pour observer les effets d'interaction. D'une part, l'interaction entre les facteurs Groupe et Position montre que les taux d'identification correcte pour la consonne d'attaque sont plus importants pour le groupe NL que pour le groupe DL (94.8 vs. 90.3% ; $p < .001$) alors qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux groupes en ce qui concerne la consonne intervocalique (98.4% vs. 97.3% ; $p = 0.17$). D'autre part, l'interaction entre les facteurs Position et taux de Compression met en évidence que la consonne intervocalique est mieux identifiée que la consonne en attaque pour toutes les conditions (100% : 99 vs. 95.9%, $p < .01$; 50% : 98.8 vs. 96.2%, $p < .01$; 25% : 98.2 vs. 94.9%, $p < .001$; 0% : 95.3 vs. 83.2%, $p < .001$). La Figure 53 montre cet effet de Position plus important chez les dyslexiques. Des différences significatives apparaissent en position d'attaque aux taux de compression à 50 et 25% ainsi que lorsque le trait est supprimé dans la condition 0%.

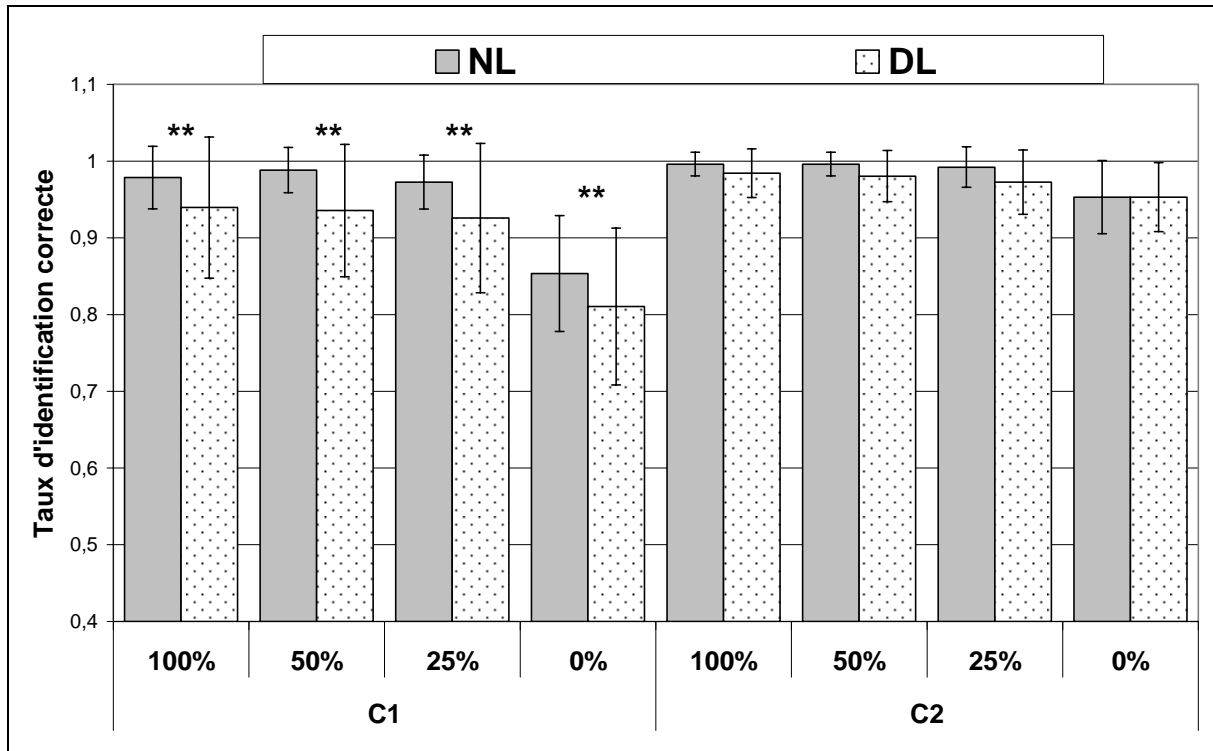


Figure 53 : Taux d'identification correcte des consonnes selon la position (C1 et C2) et selon les taux de compression (100%, 50%, 25% et 0%), pour les normo-lecteurs (NL) et les dyslexiques (DL). Résultats de l'interaction triple Groupe*Position*taux de Compression de l'ANOVA : * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.

Comme pour l'Expérience 1, dans la suite des analyses, nous allons nous intéresser aux effets de nos conditions expérimentales sur l'indice manipulé dans cette expérience qui est le lieu d'articulation. Le lieu d'articulation est représenté au niveau acoustique par la transition du formant 2. De même que dans le Chapitre 2, nous allons analyser séparément les consonnes occlusives bilabiales et les consonnes occlusives alvéolaires.

4.7.2.1. Analyse de la variance (ANOVA)

Les occlusives bilabiales

Une ANOVA à trois facteurs : le Groupe (NL, DL), la Position de la consonne (C1, C2) et le taux de Compression (100, 50, 25 et 0%) montre un effet principal pour les trois facteurs [Groupe : $F(1,31) = 14.47$, $p < .001$; Position : $F(1,31) = 13.52$, $p < .001$; taux de Compression : $F(3,93) = 3.56$, $p < .05$]. Le groupe NL est meilleur pour l'identification des occlusives bilabiales que le groupe DL (98.9% vs. 95.4%). Les occlusives bilabiales sont mieux identifiées en position intervocalique qu'en position d'attaque (98.6% vs. 95.7%). Nous observons une diminution significative des performances uniquement lorsque la durée

de la transition est supprimée (100% : 98%, 50% : 97.3%, 25% : 97.5% et 0% : 95.8% ; $p < .05$). Les effets d'interaction entre les facteurs Groupe et Position et entre les facteurs Position et taux de Compression sont également significatifs [$F(1,31) = 6.65, p < .05$; $F(3,93) = 4.55, p < .01$]. Un test de Newman-Keuls de comparaison à postériori montre un effet de la Position de la consonne chez les DL mais pas chez les NL. L'occlusive bilabiale intervocalique chez les DL est significativement mieux identifiée que celle en position d'attaque (97.9% vs. 92.9%, $p < .001$). De plus, nous observons un effet de la suppression de la durée de la transition sur l'occlusive bilabiale en attaque mais pas sur celle en position intervocalique. En position d'attaque, les performances diminuent significativement lorsque la transition est supprimée (92.8% vs. 96.9%, 96.3% et 96.7% ; $p < .001$). Bien que l'interaction triple Groupe*Position*taux de Compression ne soit pas significative, nous sommes allés observer les comparaisons grâce au test de Newman-Keuls. En position d'attaque, nous observons une différence significative entre les deux groupes pour les taux de compression à 50% ($p < .01$) et à 25% ($p < .01$). Même chose, lorsque l'indice est supprimé : les NL sont plus performants que les DL ($p < .001$). En position intervocalique, nous n'observons aucune différence significative entre les deux groupes (Figure 54).

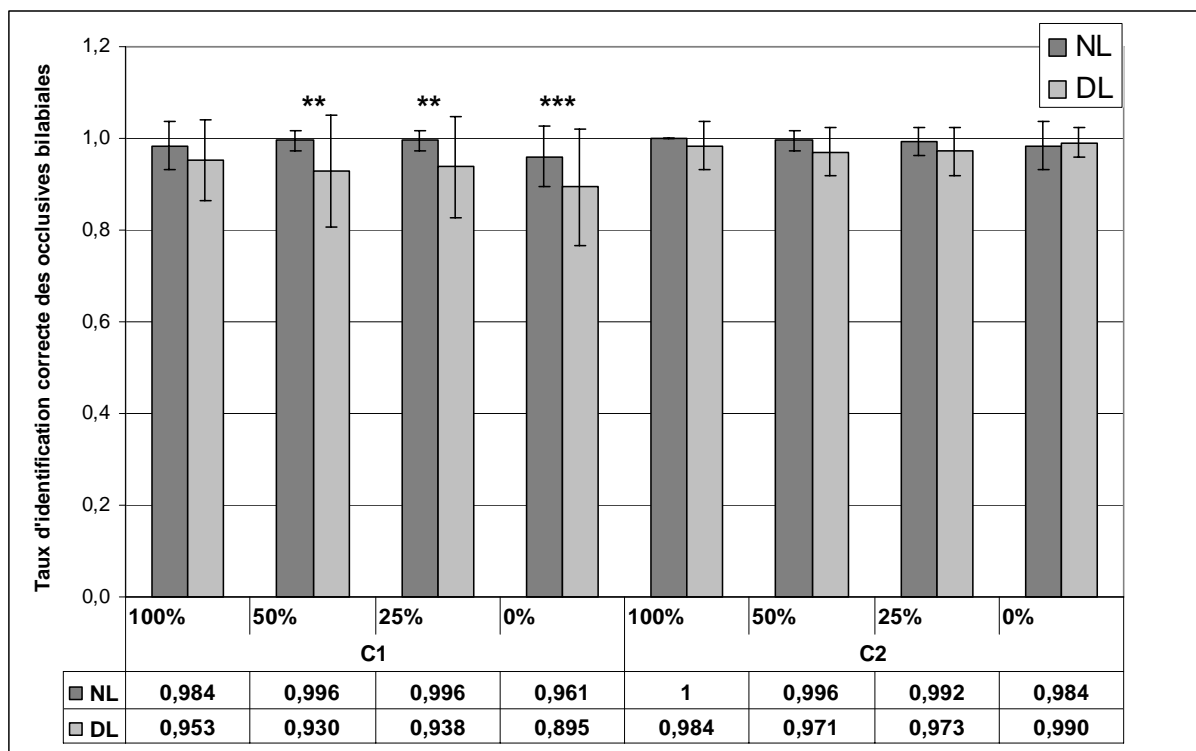


Figure 54 : Taux d'identification correcte des consonnes bilabiales selon la position (C1 et C2) et selon les taux de compression (100%, 50%, 25% et 0%), pour les normo-lecteurs (NL) et les dyslexiques (DL). Résultats de l'interaction triple Groupe*Position*taux de Compression de l'ANOVA : * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.

Les occlusives alvéolaires

Une ANOVA à trois facteurs : le Groupe (NL, DL), la Position de la consonne (C1, C2) et le Taux de compression (100, 50, 25 et 0%) ne montre pas un effet principal du facteur Groupe [Groupe : $F(1,31) = 3.37$, $p = .076$]. Mais, les effets principaux pour les facteurs Position et taux de Compression sont significatifs [$F(1,31) = 64.36$, $p < .001$; $F(3,93) = 99.76$, $p < .001$]. Le groupe NL a tendance à être meilleur pour l'identification des occlusives alvéolaires que le groupe DL (94.4% vs. 92.2%). Les occlusives alvéolaires sont mieux identifiées en position intervocalique qu'en position d'attaque (97% vs. 89.5%). Nous observons une diminution significatives des performances uniquement lorsque la durée de la transition est supprimée (100% : 96.9%, 50% : 97.7%, 25% : 95.7% et 0% : 82.8% ; $p < .001$). L'effet d'interaction entre les facteurs Position et taux de Compression est également significatif [$F(3,93) = 46.10$, $p < .001$]. Un test de Newman-Keuls de comparaison à postériori montre un effet de la suppression de la durée de la transition sur l'identification de l'occlusive alvéolaire en attaque et intervocalique. En position d'attaque, les performances diminuent significativement lorsque la transition est supprimée (73.8% vs. 94.9%, 96.1% et 93.2% ; $p < .001$). Nous remarquons également une différence significative entre les taux de compression 50% et 25% ($p < .05$). En position intervocalique, les performances diminuent significativement uniquement lorsque la transition est supprimée (91.8% vs. 98.8%, 99.3% et 98.2% ; $p < .001$). Bien que l'interaction triple Groupe*Position*taux de Compression ne soit pas significative, nous sommes allés observer les comparaisons grâce au test de Newman-Keuls. En position d'attaque, nous observons une différence significative entre les deux groupes pour la condition naturelle (100%) : les NL sont plus performants en condition naturelle que les DL (97.3% vs. 92.6%, $p < .05$). Aucune différence entre les deux groupes n'a été observée en position intervocalique (Figure 55).

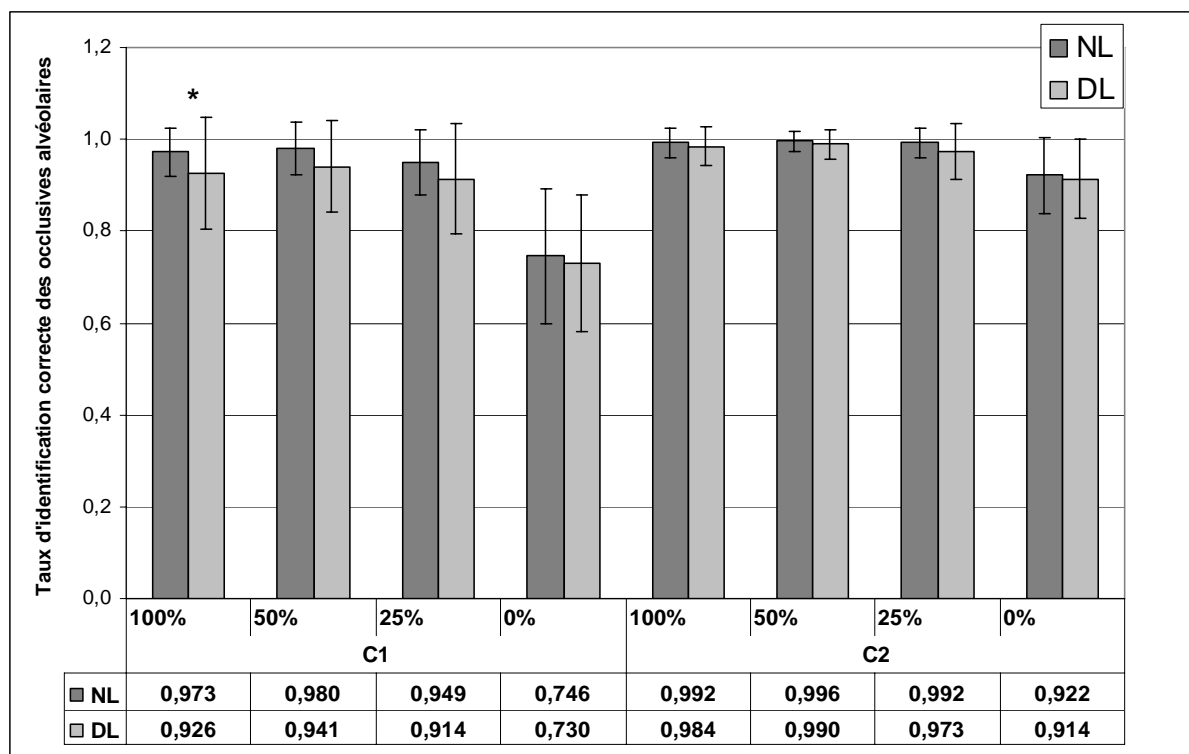


Figure 55 : Taux d'identification correcte des consonnes alvéolaires selon la position (C1 et C2) et selon les taux de compression (100%, 50%, 25% et 0%), pour les normo-lecteurs (NL) et les dyslexiques (DL). Résultats de l'interaction triple Groupe*Position*taux de Compression de l'ANOVA : * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.

4.7.2.2. Analyse qualitative des erreurs

Les matrices de confusion des occlusives présentent les erreurs faites par les normo-lecteurs et les dyslexiques pour les deux positions (Tableau 24-Tableau 27).

Les occlusives bilabiales

En position d'attaque

Les participants font peu d'erreurs sur les occlusives bilabiales (Tableau 24 et Tableau 25). Nous remarquons que l'occlusive bilabiale voisée est plus sensible en position d'attaque que l'occlusive bilabiale non voisée (/b/ -> /d/ et /b/ -> /p/). Cet effet de voisement est plus marqué chez le groupe DL.

En position intervocalique

En position intervocalique, le nombre d'erreurs est négligeable pour les deux groupes (Tableau 26 et Tableau 27). Les seules erreurs sont des confusions sur le lieu d'articulation correspondant à la confusion de /b/ avec /d/.

Les occlusives alvéolaires

En position d'attaque

En position d'attaque, les occlusives alvéolaires sont plus sensibles que les occlusives bilabiales. Nous remarquons que l'occlusive alvéolaire voisée est plus sensible que l'occlusive alvéolaire non voisée (Tableau 24 et Tableau 25). Les DL font des erreurs de voisement /d/ -> /t/, ainsi que des erreurs sur le lieu d'articulation : /d/ -> /b/ ou /t/ -> /p/. Les confusions sur le lieu d'articulation /d/ -> /b/ sont plus nombreuses chez les participants DL, et sont observées dans la condition naturelle (100%).

En position intervocalique

Le nombre d'erreurs est très faible pour les deux groupes. Les principales erreurs sont des confusions sur le lieu d'articulation comme /d/ -> /b/ ou /t/ -> /p/ qui deviennent plus nombreuses lorsque les transitions sont supprimées et chez les DL (Tableau 26 et Tableau 27).

Tableau 24 : Matrice de confusion pour la consonne d'attaque pour le Groupe dyslexiques dans l'Expérience 2 (N=128).

Condition		b	d	g	p	t	k	r	m	rien
100%	b	118	4		4				1	1
	d	6	115			7				
	p	2			126					
	t	1	1		3	122	1			
50%	b	118	5		4					1
	d	7	117			4				
	p	5			121	1				1
	t	1	3		4	117	1			2
25%	b	122	1		4					1
	d	12	109	1		4				2
	p	1			119	2				6
	t		2		3	121				2
0%	b	115	4		4			1	1	3
	d	37	78		1	8				4
	p	3			113	2				10
	t		2		10	107				9

Tableau 25 : Matrice de confusion pour la consonne d'attaque pour le Groupe contrôles dans l'Expérience 2 (N=128).

Condition		b	d	g	p	t	k	rien
100%	b	128						
	d		126			2		
	p	1			125	2		
	t		1		6	120	1	
50%	b	127	1					
	d	2	123			3		
	p				128			
	t		1		2	125		
25%	b	128						
	d	9	118	1				
	p				127	1		
	t		2		2	121	1	2
0%	b	126	1					1
	d	45	80	1		1		1
	p	3			118	2		5
	t		1		4	112		11

Tableau 26 : Matrice de confusion pour la consonne intervocalique pour le Groupe dyslexiques dans l'Expérience 2 (N=128).

Condition		b	d	p	t	rien
100%	b	125		2	1	
	d	4	124			
	p			126	2	
	t		1		127	
50%	b	123	3	2		
	d	1	127			
	p	1		127		
	t	0	1		127	
25%	b	124	3	1		
	d	3	124			1
	p			126		2
	t		2	2	124	
0%	b	127	1			
	d	12	111		1	4
	p	1		127		
	t		1	4	123	

Tableau 27 : Matrice de confusion pour la consonne intervocalique pour le Groupe contrôles dans l'Expérience 2 (N=128).

Condition		b	d	g	p	t	l	rien
100%	b	128						
	d	2	126					
	p				128			
	t					128		
50%	b	128						
	d	2	126					
	p				127			1
	t					128		
25%	b	128						
	d	1	127					
	p	1			127			
	t					128		
0%	b	127	1					
	d	7	114	1	1		1	4
	p				126	1		1
	t				3	123		2

4.7.3. Discussion

Globalement, dans cette expérience de compression temporelle des transitions, les dyslexiques présentent des performances moins bonnes que les témoins dans cette tâche auditive d'identification de pseudo-mots. Leur traitement auditif temporel du trait de lieu d'articulation est défaillant. Cependant, les dyslexiques présentent de meilleurs résultats dans cette expérience, où l'on manipule la durée des transitions, que dans l'expérience où la durée du voisement est modifiée. Comme dans l'Expérience 1, nous retrouvons une différence significative d'identification des occlusives entre les deux groupes uniquement pour la consonne en attaque de mot. Nous reviendrons dans la discussion générale sur ce déficit de traitement auditif dans les premières millisecondes chez les dyslexiques. Par ailleurs, l'absence de différence entre les deux groupes en position intervocalique suggère une utilisation pertinente de la redondance des indices acoustiques par les dyslexiques.

4.7.3.1. Les occlusives bilabiales

Les dyslexiques montrent un effet plus important des deux conditions de compression temporelle à 50 et 25% que les normo-lecteurs, uniquement en attaque. La réduction temporelle de la durée des transitions à 50 et 25% pourrait expliquer cette différence mais nous pouvons imaginer également que le traitement spectral des formants soit déficient chez les dyslexiques. Shinn, Blumstein et Jongman (1985) manipulent le débit et suggèrent que les participants n'utilisent pas l'information temporelle et qu'aucun mécanisme de compensation se met en place car les informations fréquentielles contenues dans les formants sont

suffisantes. Pour nos dyslexiques, nous suggérons qu'ils ne pourraient pas s'appuyer sur ces informations spectrales pour discriminer l'occlusive.

4.7.3.2. Les occlusives alvéolaires

Dans les conditions naturelles (100%) en attaque, nous relevons une différence significative entre les deux groupes. Les dyslexiques sont moins performants que les normo-lecteurs, ils confondent davantage le lieu d'articulation (/d/-> /b/ et /t/ -> /p/) et le voisement (/d/ -> /t/). Les dyslexiques présentent un déficit de traitement auditif temporel du trait de lieu d'articulation et du trait de voisement, ce qui peut expliquer leurs difficultés de perception des catégories. Aucune différence entre les groupes n'a été observée pour les compressions temporelles à 50 et 25%, ni pour la suppression du trait (0%), et ce, quelle que soit la position. Pourtant, nous remarquons que la compression temporelle de la durée des transitions amènent les dyslexiques à faire plus d'erreurs sur le lieu d'articulation des alvéolaires que les normo-lecteurs.

4.7.3.3. Le contraste bilabiale/alvéolaire chez les dyslexiques

Jun (1995) dit que le lieu d'articulation bilabial est celui que l'on retrouve de manière plus fiable à travers la position dans la syllabe dans le bruit. Cette observation rend compte de nos résultats globaux, puisque nous avons vu que les occlusives bilabiales étaient mieux identifiées que les occlusives alvéolaires. Or, la pente de la transition du F2 en attaque est plus raide pour les bilabiales que pour les alvéolaires (cf. analyse acoustique du Chapitre 2) donc elle est plus saillante acoustiquement, ce qui facilite la discrimination du lieu d'articulation bilabial. Les dyslexiques auraient donc des difficultés de traitement des changements fréquentiels rapides, ce qui explique les différences entre les deux groupes dans l'identification des bilabiales. La dimension temporelle ne semble donc pas être la seule dimension pertinente, la dimension spectrale des transitions apporte des informations primordiales pour l'identification. Cependant, quelle que soit la dimension qui prévaut, le trait de lieu d'articulation est nécessaire à l'identification puisque la suppression de ce trait conduit à une diminution des performances en position d'attaque. En position intervocalique, nous mettons en avant la redondance du signal, notamment grâce à la voyelle précédente (V_1C) dont la transition finale est identique à la transition CV_2 . Nous émettons l'hypothèse selon laquelle le traitement de la durée des transitions n'est pas pertinent chez les dyslexiques (comme chez les témoins) et qu'ils ont des difficultés de traitement des informations spectrales qui les mènent à faire des erreurs de lieu d'articulation (p. ex. /ba/ -> /da/). Nous

reviendrons sur la notion de saillance acoustique et sur les indices spectraux dans la discussion générale qui suit.

4.8. Discussion Générale

Le système auditif doit être capable d'encoder des indices acoustiques, qui sont à la base des représentations acoustico-phonétiques corticales, qui seront mis en relation avec des traits distinctifs à un niveau phonémique. Une représentation parfaite des détails spectraux et temporels des indices acoustiques facilite l'encodage des figures acoustiques dans les représentations phonologiques. Le traitement de l'information auditive doit donc être optimal. Des déficits des résolutions temporelle et spectrale (Ahissar, Protopapas, Reid, & Merzenich, 2000) ou un ralentissement du signal qui permet de séparer les traits phonétiques (Helenius, Uutela, & Hari, 1999) affecteraient les manipulations grapho-phonémiques ce qui rend la lecture lente et difficile.

L'objectif de cette étude était de préciser les mécanismes de traitement auditif et phonologique qui sont déficitaires chez les dyslexiques. Nous avons comparé les résultats de dyslexiques adultes appariés à des normo-lecteurs, concernant au niveau acoustico-phonétique, d'une part, les compétences dans le traitement du trait de voisement (Expérience 1) et, d'autre part, les compétences dans le traitement du trait de lieu d'articulation (Expérience 2). Cette sensibilité au voisement et au lieu d'articulation a été étudiée à l'aide d'une tâche auditive d'identification de pseudo-mots compressés sur ces indices (cf. Chapitre 2).

4.8.1. Le voisement

La barre de voisement pour les occlusives voisées semble un indice acoustique qui rend compte du déficit de perception des dyslexiques. De même que le VOT des occlusives non voisées qui semble contenir des informations (burst, voisement) nécessaires à l'identification. En effet, nous avons observé dans l'Expérience 1 des différences de performances d'identification des occlusives voisées et non voisées entre les groupes. Les dyslexiques ont montré un déficit de traitement du trait de voisement en condition naturelle mais également en condition de compression temporelle. Il semble que la discrimination des occlusives selon la durée du voisement soit difficile pour les dyslexiques lorsque la durée du trait est réduite. Ces effets sont plus marqués en position d'attaque et pour les occlusives non voisées (i. e. VOT).

Dans une tâche d'identification, le long d'un continuum /ba-/pa/ variant sur la longueur du voisement (Veillet, Magnan, & Ecalle, 2004), la frontière phonémique est décalée vers la droite pour les enfants dyslexiques. Les dyslexiques sont sensibles au voisement de manière

différente des enfants contrôles. Les différences sont principalement observées lorsque la durée du voisement est courte ce qui indiquerait un déficit de traitement auditif temporel des signaux de courte durée. Lorsque la durée du voisement diminue, la perception de la frontière catégorielle devient floue pour les dyslexiques ce qui les amènent à faire des erreurs de catégorisation des consonnes vis-à-vis du voisement. Les travaux de Serniclaes et ses collaborateurs (Serniclaes, Sprenger-Charolles, Carré, & Demonet, 2001 ; Serniclaes, Van Heghe, Mousty, Carré, & Sprenger-Charolles, 2004) mettent en évidence un mode de perception allophonique chez les dyslexiques. Ils peuvent percevoir deux phonèmes comme des variations d'un même phonème. Les dyslexiques sont dit « moins catégoriels » du fait probablement d'une organisation imprécise et peu détaillée des représentations phonémiques.

Par ailleurs, Fant (1973) a déclaré que les occlusives non voisées ont des trajectoires de transitions plus stables, moins variables que les occlusives voisées. Cette étude expliquerait nos résultats sur l'effet de voisement. Les occlusives voisées seraient plus sensibles que les non voisées du fait de l'instabilité et de la variabilité de leur transition. D'où les confusions plus importantes observées sur les occlusives voisées (Saerens, Serniclaes, & Beeckmans, 1989).

Nous pouvons également noter que dans l'Expérience 2, nous retrouvons les difficultés de perception et d'identification de la barre de voisement chez les dyslexiques. Ce résultat renforce l'hypothèse selon laquelle la barre de voisement est un indice temporel difficilement traité par les dyslexiques.

4.8.2. Le lieu d'articulation

Dans l'Expérience 2, nous avons manipulé la durée des transitions des formants, dont F2. Les résultats ont montré que les occlusives bilabiales étaient plus résistantes que les alvéolaires à la compression temporelle et que les dyslexiques font principalement des erreurs de lieu d'articulation (p. ex. /d/ -> /b/), ce qui indique des difficultés de traitement de la transition du F2 qui est un indice de lieu d'articulation. Les dyslexiques sont moins performants que les témoins sur l'identification des bilabiales en position d'attaque (/b/ -> /d/ et /b/ -> /p/). Selon Bradlow et al. (1999), une durée différentielle de transition de 7 ms entre deux stimuli serait suffisante pour discriminer le lieu d'articulation. Nous avons émis l'hypothèse selon laquelle la durée de la transition ne serait pas un indice pertinent pour rendre compte du déficit perceptuel chez les dyslexiques. Nous suggérons que les changements de fréquences rapides sont plus difficiles à traiter pour les dyslexiques. En effet, si l'on se réfère aux données sur les mesures de pente de la transition du F2 (cf. Chapitre 2),

nous remarquons que les bilabiales ont une pente plus raide que les alvéolaires, en position d'attaque. Cette pente devient encore plus raide avec la compression temporelle, la rendant plus saillante acoustiquement. Les résultats des dyslexiques reflètent ces difficultés de traitement fréquentiel des transitions de la bilabiale voisée en attaque. Nos résultats sont en accord avec ceux Kraus et al. (1996) qui montrent que certains enfants LP présentent des difficultés à discriminer la paire /da-/ga/ (même durée de transition mais changement fréquentiel rapide) mais ils ne présentent pas de déficit à distinguer le contraste /ba-/wa/ (durée de transition plus longue pour /wa/, 75 à 150 ms comparé à 50 à 75 ms pour l'occlusive). La discrimination du contraste /da-/ga/ repose donc sur le traitement des changements fréquents rapides, ce qui indique un déficit de ce traitement chez les enfants LP. On ne peut pas conclure sur le déficit de traitement auditif temporel des indices brefs et rapides mais on peut suggérer que ces enfants présentent un déficit de traitement auditif spectral.

D'autres études ont porté sur la paire [ba]-[da] montrant un déficit de perception catégorielle chez les dyslexiques (Reed, 1989) ou comme le dit Kraus et al. (1996) : seulement chez certains dyslexiques (Mody, Studdert-Kennedy, & Brady, 1997). Les changements spectro-temporels ne sont pas traités de la même manière par tous les enfants LP donc les informations seraient traitées par des mécanismes différents le long des voies auditives ascendantes.

4.8.3. Les consonnes occlusives : un point faible

Adlard et Hazan (1998) étudient les performances d'enfants ayant des troubles d'apprentissage de la lecture dans de nombreuses tâches de discrimination et d'identification de la parole. Parmi toutes ces épreuves, une nous a intéressée particulièrement : le test de discrimination de la consonne intervocalique dans une paire de pseudo-mots de forme VCV. Les consonnes d'une paire avaient le même mode d'articulation mais se différenciaient sur le lieu d'articulation ou sur le voisement. Les auteurs montrent que le groupe d'enfants avec des troubles d'apprentissage de la lecture fait significativement plus d'erreurs que les groupes contrôles sur les consonnes occlusives comparées aux fricatives, aux nasales et aux approximantes. Cette étude met en évidence la sensibilité particulière des enfants avec des troubles d'apprentissage de la lecture pour la discrimination des contrastes de voisement et de lieu d'articulation des occlusives. Les occlusives sont un point faible de ces enfants en difficultés du fait même de leur nature articulo-acoustique lors de l'apprentissage de la lecture. Une description de ces consonnes a été faite dans le Chapitre 1. Les occlusives

correspondent à des sons complexes avec différentes phases, notamment des phases très rapides, comme par exemple les transitions formantiques ou le burst, qui vont être difficile à percevoir pour des enfants dyslexiques.

4.8.4. La proximité phonétique

Un déficit de traitement auditif temporel de ces courtes durées pourrait expliquer les difficultés rencontrées lors de la discrimination de deux sons très proches phonétiquement (cité par Adlard & Hazan, 1998 ; Mody, 1993). L'étude de Adlard et Hazan (1998) montre une autre différence significative apparaît entre les groupes dans un test de discrimination de clusters consonantiques lorsqu'une des deux lettres du cluster est substituée par une autre (p. ex. « smack »-« snack »). Les enfants avec des difficultés de lecture font globalement plus d'erreurs que les groupes contrôles. Le plus intéressant est que les taux d'erreurs les plus importants sont observés lorsque la consonne substituée dans la paire de mots ne diffère que par un seul trait distinctif : le lieu d'articulation. Au contraire, lorsque la consonne substituée de la paire diffère par trois traits pertinents (mode, lieu d'articulation et voisement), les taux d'erreurs sont plus bas. Les auteurs suggèrent que les contrastes qui posent problème aux enfants sont des contrastes proches phonétiquement c'est-à-dire qui diffèrent sur un seul trait comme nous venons de le voir. Bedoin (2003) conclue également sur la même hypothèse c'est-à-dire que plus les phonèmes se ressemblent phonétiquement, plus leurs représentations s'inhibent mutuellement, selon un principe d'inhibition latérale. Les enfants dyslexiques présentent des difficultés à discriminer des stimuli visuels qui diffèrent sur le trait de voisement uniquement. Selon l'auteur, ces enfants auraient une inhibition latérale au niveau phonémique trop faible. Adlard et Hazan (1998) rajoutent que ces contrastes problématiques sont également très proches acoustiquement c'est-à-dire qu'ils diffèrent par un indice qui n'est pas saillant au niveau acoustique. D'où l'intérêt d'étudier le rôle relatif des indices acoustiques dans la perception de la parole chez les dyslexiques. Cela reviendrait à mesurer une distance perceptive qui rendrait compte de l'intelligibilité de la parole (Krull, 1990). Les auteurs font l'hypothèse que les problèmes de discrimination ne sont pas limités à des contrastes qui sont marqués par des indices temporels rapides et brefs (comme pour les occlusives), comme le suggère les travaux de Tallal, mais ces difficultés peuvent apparaître également pour des contrastes qui contiennent des indices spectraux qui ne sont pas saillants au niveau acoustique (p. ex. dans notre étude, la transition du F2 des alvéolaires en position d'attaque).

4.8.5. La saillance acoustique

La saillance acoustique ne dépend pas seulement du contexte consonantique mais également du contexte vocalique dans lequel la consonne est présentée, ce qui déterminera également la forme des transitions des formants (Dorman, Studdert-Kennedy, & Raphael, 1977). L'étude de Adlard et Hazan (1998) conclue que le développement de la conscience phonémique et des connaissances phonologiques est basé sur la saillance acoustico-phonétique. Les contrastes phonémiques qui ne sont pas saillants acoustiquement sont typiquement acquis plus tardivement dans l'acquisition normale du langage et semble particulièrement problématique chez des enfants avec des troubles du langage. Ils remarquent que tous ces enfants ne sont pas affectés de la même manière par cette dimension. Nous pouvons donc suggérer que les dyslexiques présentent des difficultés de contrastes sur des indices acoustiques non saillants comme la durée du voisement ou la durée des transitions.

4.8.6. Le poids respectif des indices

Nittrouer (1992) montre que les enfants donnent plus de poids aux informations venant des transitions formantiques dynamiques que les adultes. Adlard et Hazan (1998) observent, en effet, de meilleures performances pour les contrastes sur la transition du F2 que pour les contrastes sur le burst. Les travaux de Tallal prédisaient que les enfants avec un trouble du langage ne seraient pas capables d'utiliser les transitions rapides des formants comme seuls indices de contraste. Dans notre étude, nous avons mis en évidence un déficit de perception de la durée de voisement et du changement fréquentiel rapide de la transition du F2 chez les dyslexiques adultes.

4.8.7. La redondance des indices

Hazan et Rosen (1991) mettent en évidence que certains adultes normo-entendants ont besoin d'une redondance plus importante des informations apportées par les indices pour réussir à discriminer des phonèmes. Une diminution des performances de discrimination des stimuli lorsque certains indices acoustiques sont manquants suggère que certains enfants utilisent pertinemment la redondance des informations des indices acoustiques et montrent des difficultés de perception de la parole dégradée, comme par exemple, la parole dans le bruit ou filtrée. Dans notre étude, nous remarquons que les dyslexiques, comme les normo-lecteurs, utilisent la redondance des indices, particulièrement en position intervocalique. Cette position correspond à un contexte très riche en indices acoustiques. De plus, cette position est le lieu privilégié pour les phénomènes de coarticulation et d'assimilation.

4.8.8. Un aperçu de méthodes d'entraînement

Les méthodes de rééducation des problèmes de lecture sont en plein essor depuis que les résultats de la recherche permettent de faire un diagnostic précoce chez les enfants dyslexiques mais également depuis que la recherche s'intéresse à la dyslexie chez l'adulte. Un diagnostic précis et détaillé permet d'intervenir de manière appropriée sur la rééducation de certaines difficultés en priorité.

Pourtant, il est difficile de relier les compétences auditives et les compétences en lecture. Les méthodes d'entraînement utilisant un apprentissage basé sur la modalité auditive permettent d'observer si cet entraînement auditif a un effet sur les capacités en lecture. Une amélioration de ces capacités en relation avec un entraînement basé sur un traitement auditif a été montrée dans différentes études avec diverses sensibilités (Ahissar, Protopapas, Reid, & Merzenich, 2000 ; Kraus, 2001 ; Krifi, Bedoin, & Mérigot, 2003 ; Magnan, Ecalle, & Veillet, 2005 ; Veillet, Magnan, & Ecalle, 2004 ; Witton et al., 1998). Par exemple, Bedoin (2003) a utilisé un entraînement audio-visuel pour évaluer l'effet de l'entraînement sur la sensibilité au trait de voisement en lecture. L'enfant doit catégoriser une séquence auditive (p. ex. [ba]) selon deux propositions présentées à l'écran (i. e. /pa/ ou /ba/). L'entraînement a un effet bénéfique chez les dyslexiques qui l'ont suivi : ils ont de meilleures performances en catégorisation. L'entraînement permettrait d'améliorer l'organisation des représentations des traits phonétiques. D'autre part, cet entraînement a aussi impliqué, chez certains enfants, une accentuation de la latéralisation du système olivo-cochléaire médian (Veillet, Magnan, Ecalle, Thai-Van, & Collet, 2007).

Simos et al. (2002) démontrent une plasticité cérébrale de certaines aires dédiées au langage après un programme d'entraînement intensif chez des enfants dyslexiques. La rééducation portait principalement sur les troubles phonologiques des enfants. L'activation cérébrale de la partie postérieure du gyrus temporal supérieur gauche était équivalente à celle de normo-lecteurs après le programme d'entraînement. De même, Eden et al. (2004) observent des changements d'activation cérébrale chez des adultes dyslexiques suite à un entraînement basé sur des manipulations phonologiques. Les auteurs observent une augmentation d'activité des régions pariétales dans l'hémisphère gauche chez les dyslexiques analogue à celle chez les normo-lecteurs. La différence repose sur une activité supplémentaire de plusieurs régions dans l'hémisphère droit chez les dyslexiques. L'activation cérébrale dans l'hémisphère droit chez les dyslexiques adultes reflèterait des mécanismes de compensation

dus à un déficit de traitement des régions pariétales gauches, impliquées dans le traitement phonologique.

L'ensemble de ces études soulignent l'importance d'une évaluation neuropsychologique plus approfondie de chaque individu afin de bien identifier les déficits de chacun et ainsi trouver des solutions de rééducations adaptées à chaque cas.

L'une des différentes voies d'études sur le déficit de traitement auditif temporel que nous allons aborder dans le Chapitre 5 est l'exploration du fonctionnement des voies auditives descendantes du système efférent olivocochléaire médian (filtre inhibiteur, extracteur de traits acoustiques pertinents) (Veillet, Bazin, & Collet, 1999) qui est probablement sous contrôle central (Khalfa, Bougeard et al., 2001). Le fonctionnement de ce système efférent influence la perception de la parole, par conséquent, un dysfonctionnement de cette voie descendante chez les dyslexiques pourrait expliquer leur trouble de perception de la parole. Nous explorons l'hypothèse d'une origine auditive à la dyslexie.

Chapitre 5

L'étude des voies auditives descendantes: comparaison dyslexiques adultes vs. contrôles adultes

5.1. Introduction

Jusqu'à maintenant, nous avons mis en évidence des déficits de traitement auditifs chez les dyslexiques adultes, aussi bien sur le voisement que sur le lieu d'articulation. De nombreuses études, qui seront présentées ensuite, ont examiné l'hypothèse de l'implication des voies descendantes dans le traitement de la parole dégradée. L'implication du système efférent dans la perception de la parole dans le bruit a fait l'objet de la plupart des études et cette implication a été démontrée (Micheyl & Collet, 1996 ; Micheyl, Morlet, Giraud, Collet, & Morgon, 1995 ; Micheyl, Perrot, & Collet, 1997). Dans le cas de la parole dégradée par compression temporelle, aucune étude n'a été réalisée jusqu'à présent. Pourtant, les changements de débit des locuteurs est une cause fréquente de variabilité du signal acoustique et de perte d'intelligibilité de la parole. Nous allons donc, dans ce cinquième et dernier chapitre, nous demander si des différences d'implication des voies auditives descendantes dans la perception de la parole compressée, chez les dyslexiques adultes comparés à un groupe de témoins adultes, seraient à l'origine des déficits perceptifs des dyslexiques.

Nous allons, tout d'abord, présenter l'anatomie et le fonctionnement de ces voies auditives descendantes, puis nous verrons comment évaluer le fonctionnement du système efférent olivocochléaire médian (SEOCM).

5.1.1. Les voies auditives descendantes

Le système auditif présente une particularité par rapport aux autres systèmes sensoriels, il est le seul où une voie descendante se projette directement sur l'organe sensoriel même (la cochlée). Durant l'intégration et l'analyse de la stimulation sonore, le cerveau peut influencer sur le traitement de manière appropriée. Le cerveau va emprunter les voies auditives descendantes (efférentes). Les voies cortico-olivocochléaires proviennent du cortex auditif (CA) et permettent un contrôle direct sur la cochlée (précisément sur les cellules ciliées dans l'organe de Corti, cf. Chapitre 1) (Figure 56). Les voies cortico-olivocochléaires se divisent en deux systèmes : le système efférent olivocochléaire médian (SEOCM) et le système efférent olivocochléaire latéral (SEOCL). Le SEOCM est le système dont le fonctionnement est le plus connu alors que le réflexe du SEOCL n'est toujours pas démontré précisément.

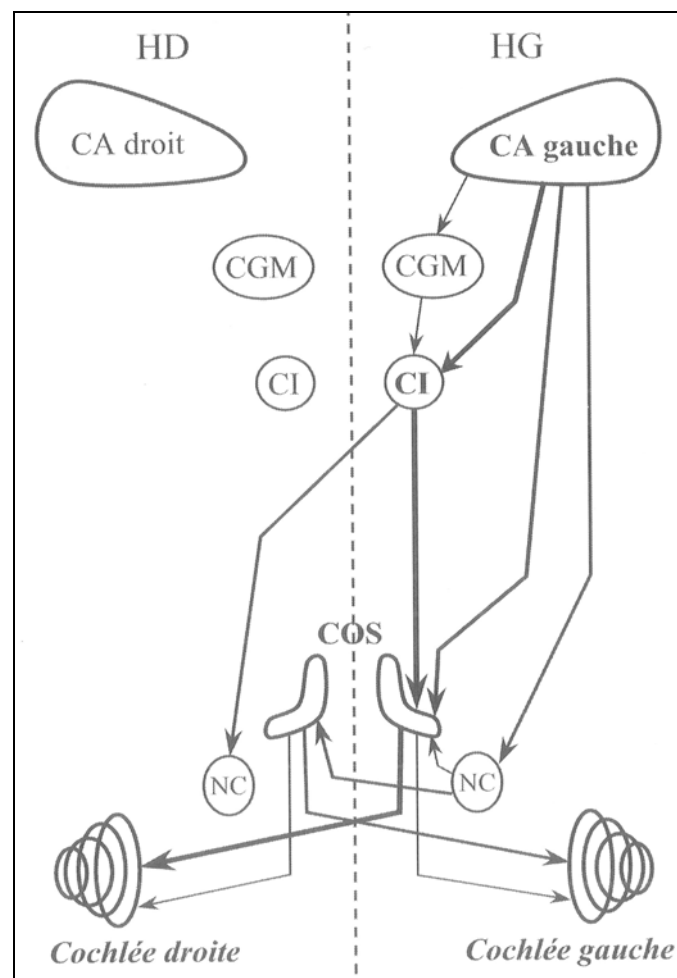


Figure 56 : Schéma global des voies auditives descendantes (tiré de la thèse de Xavier Perrot, 2003). L'épaisseur des traits illustre l'importance relative de chaque voie. Toutes les projections bilatérales n'ont pas été représentées. CA = cortex auditif, CGM = corps genouillé médian, CI = colliculus inférieur, COS = complexe olivaire supérieur, HD = hémisphère droit, HG = hémisphère gauche, NC = noyau cochléaire. (D'après Huffman & Henson, 1990 ; Khalfa, 1999 ; Thompson & Schofield, 2000).

5.1.1.1. L'anatomie des systèmes efférents olivocochléaires

La description anatomique des voies auditives descendantes a été principalement étudiée sur des animaux mais des études *post-mortem* ont confirmé une anatomie quasi similaire chez l'Homme (1999). Les fibres du SEOCM et du SEOCL prennent naissance dans le complexe olivaire supérieur (COS) (Figure 56). Le SEOCM trouve son origine dans les noyaux médians du COS alors que le SEOCL, dans les noyaux latéraux (Warr & Guinan, 1979). La voie médiane se projette sur les cellules ciliées externes (CCE) alors que la voie latérale se projette sur les neurones qui afférentes les cellules ciliées internes (CCI) dans l'organe de Corti. Les grosses fibres myélinisées du SEOCM se projettent sur la partie médiane de la cochlée, de chaque oreille et se projettent via le nerf vestibulaire sur les CCE de la cochlée, formant ainsi la dernière étape des voies auditives descendantes qui viennent du cortex (Huffman & Henson, 1990). Les fibres fines et non myélinisées du SEOCL de la cochlée prennent leur origine majoritairement du côté droit du cerveau (ipsilatéral). Elles se projettent via le nerf vestibulaire sur les fibres qui afférentes les CCI, ce qui correspond à une innervation efférente indirecte.

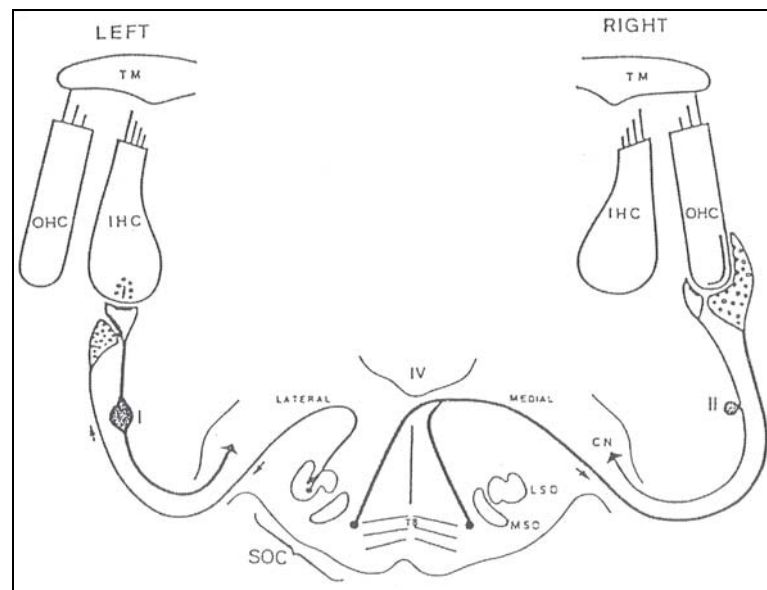


Figure 57 : Représentation schématique du système efférent olivocochléaire (tiré de la thèse de Xavier Perrot, 2003). SOC = complexe olivaire supérieur, CN = noyau cochléaire, IHC = cellules ciliées internes, LSO = noyau olivaire latéral, MSO = noyau olivaire médian, TM = membrane tectoriale (D'après Eybalin, 1993).

5.1.1.2. Les projections olivocochléaires

Le SEOCM comporte deux faisceaux : un faisceau ipsilatéral et un contralatéral. Le faisceau ipsilatéral est un système doublement croisé (De Venecia, Liberman, Guinan Jr, & Brown, 2005). Au contraire, le faisceau contralatéral utilise des fibres non croisées. Chez

l'Homme, les deux faisceaux présentent peu de différences mais les données sur le ratio des neurones croisés et non croisés sont très rares du fait de l'utilisation de techniques anatomiques invasives, dont l'utilisation est impossible chez l'Homme. Cependant, chez des espèces animales très proches génétiquement de l'Homme, chez le singe par exemple, le rapport est de 60% de fibres ipsilatérales pour 40% de fibres controlatérales. Mais chez d'autres espèces animales plus éloignées génétiquement (comme le hamster ou le chat), le faisceau ipsilatéral est deux à trois fois plus fort que le controlatéral (donc plus de fibres croisées). Chez l'Homme, la proportion de fibres croisées (ipsilatérales) est plus importante au niveau de la base de la cochlée (hautes fréquences) et diminue en allant à l'apex (basses fréquences).

En ce qui concerne le SEOCL, dont les données sont plus rares, il serait composé de projections majoritairement non croisées. Le réflexe SEOCL est majoritairement ipsilatéral.

5.1.1.3. La physiologie olivocochléaire

Le SEOCM possède de grosses fibres myélinisées ce qui permet d'enregistrer et de stimuler électriquement ces fibres. Au contraire, le SEOCL est constitué de fibres fines et non myélinisées qui rendent difficile son étude, ce qui explique en grande partie le manque de connaissances à son sujet.

L'activation du SEOCM va inhiber la réponse cochléaire en diminuant le gain de l'amplificateur cochléaire. Le SEOCM modifie, par l'intermédiaire des contractions lentes (cf. Chapitre 1), les propriétés électromotiles des CCE. Le système efférent pourrait contrôler les vibrations de la membrane basilaire par l'intermédiaire des CCE. La stimulation des fibres efférentes provoque l'inhibition d'une portion de la cochlée. L'inhibition est meilleure à la fréquence caractéristique (FC) qui suit la densité anatomique des fibres. Les projections du SEOCM sur les CCE sont plus nombreuses à la base de la cochlée et diminuent en allant à l'apex, en d'autres termes, l'inhibition est meilleure pour les moyennes et hautes fréquences. Il est important de noter que ces résultats ont été obtenus à partir d'études chez l'animal mais pas chez l'Homme.

5.1.1.4. Les rôles des systèmes efférents olivocochléaires dans l'audition

Le SEOCL

Les rôles du SEOCL sont encore mal connus. Cependant, Ruel et al. (2001) rapportent un rôle de protection contre les traumatismes acoustiques. Guinan Jr. (1996), lui, évoque un rôle

dans la production d'activation cochléaire binaurale balancée (pour une revue voir Groff & Liberman, 2003). Au niveau de la synapse CCI/fibre afférente, le SEOCL pourrait ajuster la sensibilité des fibres afférentes. Les fibres non myélinisées évoquent une conduction lente de l'information nerveuse et par conséquent des effets lents. De plus, plusieurs types de neurotransmetteurs reflètent probablement des mécanismes excitateurs et inhibiteurs. Les effets du SEOCL semblent diminuer progressivement au cours du temps.

Le SEOCM

Comme nous allons le voir en détail, les rôles du SEOCM sont multiples : tout d'abord, le SEOCM augmente la détection de stimuli pertinents noyés dans du bruit. Puis, le SEOCM protège l'oreille de surstimulations acoustiques. Enfin, il améliore la perception de la parole dans le bruit. En effet, il existe une corrélation entre l'efficacité du rétrocontrôle du SEOCM et la mesure d'intelligibilité de la parole dans le bruit.

Le rôle de démasquage

Le premier rôle est un rôle de démasquage (« antimasking effect »). La fonction du SEOCM serait d'augmenter la discriminabilité d'un son bref dans du bruit. Des études, chez le chat, ont permis de mettre en évidence qu'une section du faisceau olivocochléaire réduisait les performances dans une tâche de discrimination de formant ou d'intensité pour des sons de haute fréquence dans du bruit (Hienz, Stiles, & May, 1998 ; May & McQuone, 1995). Un effet rapide du SEOCM (de l'ordre de 100 ms) a été observé dans un environnement bruyant. L'activation du SEOCM peut améliorer les réponses du nerf auditif à un son bref (Dolan & Nuttall, 1988). Si nous considérons que le taux de décharge du nerf auditif est élevé à basse intensité pour une réponse au bruit et que le taux de décharge du nerf auditif est diminué à forte intensité à cause de l'adaptation au bruit, par conséquent, un bruit continu va masquer partiellement la réponse du nerf auditif. La stimulation du SEOCM va inhiber la réponse au bruit, réduire l'adaptation ce qui va restaurer les réponses des fibres : le SEOCM a donc un rôle de démasquage. Des effets plus lents du SEOCM (de l'ordre de 10 s) ont été également observés. Les effets rapides et lents sont probablement dus à des changements mécaniques différents au niveau des CCE.

Des études anciennes sur les animaux ont montré que l'activation des réseaux efférents pouvait améliorer l'audition dans le bruit en exerçant un effet d'anti-masquage (Kawase, Delgutte, & Liberman, 1993 ; Kawase & Liberman, 1993). Kawase et Liberman (1993) ont montré, chez l'animal, que si on présente à une oreille un son et qu'on en présente un

deuxième dans l'autre oreille, alors le son perçu dans la première diminue. Avec un masquage énergétique (bruit), il y a aussi une diminution de la réponse si un bruit est présenté dans l'oreille, mais il y a une activation moyenne s'il y a du bruit dans la seconde. Il s'agit d'un effet de démasquage. Par contre, avec une lésion des voies efférentes, il n'y a plus d'effet de démasquage. Dans des conditions écologiques, le système efférent est activé par le bruit et engendre un démasquage central. Nous avons ainsi des preuves du rôle du système olivaire médian dans le traitement périphérique des signaux de parole présentés dans du bruit.

Le rôle de protection

Un second rôle est un rôle de protection contre les dommages causés par des sons de trop forte intensité (pour une revue voir Rajan, 2000). Il semblerait que les effets lents du SEOCM soient plus importants dans ce rôle de protection.

Le rôle dans le bruit

Le troisième rôle est son implication dans l'amélioration de la perception dans le bruit. Des études ont révélé une corrélation entre les performances auditives des patients et l'activation du SEOCM. L'activité du SEOCM peut être augmentée en plaçant du bruit dans l'oreille opposée. Chez l'Homme, le fonctionnement faible du SEOCM est corrélé à une détection défaillante des sons dans le bruit (Micheyl & Collet, 1996 ; Micheyl, Khalfa, Perrot, & Collet, 1997 ; Micheyl, Perrot, & Collet, 1997) et une perte d'intelligibilité de la parole dans le bruit chez l'adulte (Giraud et al., 1997) et chez l'enfant (Kumar & Vanaja, 2004). Giraud et al. (1997) utilisent de la parole dans le bruit chez des patients dont le nerf vestibulaire est sectionné et ils n'observent pas cette amélioration du fait de l'inefficacité du système efférent. Les modulations corticofuges peuvent être médiées par les fibres du SEOCM, un tel effet a pu être démontré suite à la section corticale de ces fibres chez des patients (Khalifa, Bougeard et al., 2001) et par stimulation électrique corticale chez des épileptiques (Perrot et al., 2006). Un rôle important de l'influence descendante du cortex auditif sur le SEOCM a été démontré (Collet et al., 1993 ; Khalifa, Bruneau et al., 2001). Le feedback cortical peut être fondamental dans le développement auditif. Dans des cas pathologiques, comme l'autisme, qui présentent une audition anormale ou des difficultés de communication, l'atteinte du SEOCM peut expliquer ces troubles. Pour conclure, il semble donc qu'une des fonctions principales du SEOCM soit ce rôle de démasquage de la parole dans le bruit.

Des études ont montré un effet de l'attention sur l'activation du SEOCM (Giard, Collet, Bouchet, & Pernier, 1994 ; Maison, Durrant, Gallineau, Micheyl, & Collet, 2001) lorsque les participants s'attendent à un stimulus d'une fréquence spécifique, ils peuvent changer le niveau d'activation du SEOCM de manière à sélectionner la fréquence.

Pour schématiser les différents effets des systèmes efférents olivocochléaires au cours du temps, les premiers effets sont les effets rapides du SEOCM (de l'ordre de 100 ms) puis les effets lents du SEOCM (de l'ordre de 10 s) et enfin, les effets du SEOCL (de l'ordre de la minute).

5.1.2. Les otoémissions acoustiques

5.1.2.1. La définition

Les otoémissions acoustiques (OEA) sont des sons produits par le système auditif périphérique, plus précisément par l'activité des cellules ciliées externes (CCE) situées dans la cochlée au niveau de l'oreille interne (Brownell, 1990 ; Kemp, 2002). Brownell (1983) découvre le mécanisme actif de motilité des cellules ciliées. L'électromotilité est une caractéristique fonctionnelle des CCE permettant une amplification des mouvements par les CCE. Les OEA peuvent être générées uniquement si cette amplification cochléaire a lieu et est à un certain degré fonctionnel. Ces OEA se propagent en sens inverse, elles traversent l'oreille moyenne puis elles sont enregistrées dans le canal auditif externe à l'aide d'un microphone (Kemp, 1978). Il existe plusieurs types d'OEA dont les OEA spontanées (OEAS) et les OEA provoquées (OEAP).

Les otoémissions acoustiques spontanées (OEAS)

Les OEAS sont générées en l'absence de toute stimulation sonore et sont le reflet d'une désorganisation architecturale des CCE (contractions spontanées). Elles sont présentes chez 30 à 40 % des sujets normo-entendants, chez l'adulte (Penner & Zhang, 1997) et chez le nouveau-né qui ont des rangées de CCE surnuméraires (Burns, Arehart, & Campbell, 1992), et encore plus chez la femme (50% vs. 25% chez l'homme) et dans l'oreille droite (Moulin, Collet, Veuillet, & Morgon, 1993). La présence d'OEAS est le reflet d'une sensibilité particulière aux changements métaboliques et physiologiques de la cochlée. On observe une corrélation entre une bonne audition et la probabilité d'avoir des OEA spontanées.

Les otoémissions acoustiques provoquées (OEAP)

Les OEAP sont recueillies en réponse à une stimulation acoustique brève, comme un clic. La stimulation va activer les processus cochléaires au niveau des CCE. Elles fournissent une « empreinte digitale » de l'oreille de l'individu, étant très stable en composition spectrale au cours du temps.

5.1.2.2. La physiologie des OEA

Depuis leur découverte par Kemp (1978), les OEA ont fait l'objet de nombreuses recherches. Le mouvement des cils des cellules ciliées qui sont très petits (10^{-10} m) crée des OEA de grande intensité (34 dB SPL) qui passent dans un canal auditif d'un volume de 1 ml. Les OEA peuvent avoir 3 origines différentes : la première est un enchevêtrement anarchique des CCE qui provoquerait une motilité spontanée de ces cellules, la seconde serait due à une électromotilité active des CCE non linéaire qui induit une distorsion du signal et la troisième et dernière origine serait une activité spontanée des CCE par des mécanismes de réflexions des énergies.

Une question qui s'est posée était de savoir si les OEA reflétaient l'état fonctionnel de la cochlée. Premièrement, les OEA se propagent au travers de l'oreille moyenne et du conduit auditif externe en sens inverse des stimuli sonores. L'état de ces deux structures est donc primordial dans le recueil des réponses. Les oscillations enregistrées correspondent aux mouvements liquidiens induits dans l'oreille interne par les contractions des CCE qui vont d'avant en arrière. Les réponses sont longues et complexes car elles sont générées dans différentes parties de la cochlée (entre la base et l'apex) : elles se décomposent donc en latence et en fréquence. Deuxièmement, la fréquence à laquelle l'OEA est évoquée est significative : la réponse cochléaire est spécifique en fréquence et les OEA n'apparaissent que pour les bandes de fréquences où l'audition est quasi normale. Les clics sont des sons brefs à large bande permettant d'activer un maximum de fréquences le long de la partition cochléaire. La détection des OEA est plus facile et plus importante dans la première bande de fréquences de la parole, 1 à 4 kHz (entre 6 et 7 kHz chez l'enfant). Leurs présences impliquent un bon fonctionnement cochléaire et des pertes auditives égales ou inférieures à 40 dB HL. Collet, Levy, Veuillet, Truy et Morgon (1993) n'obtiennent pas d'OEAP lorsque la perte auditive sur la meilleure fréquence dépasse 40 dB HL. Les OEA sont, d'une part, une fenêtre ouverte sur la cochlée puisque leur présence confirme un fonctionnement présynaptique cochléaire normal. D'autre part, elles sont un moyen pour mettre en évidence l'influence corticale sur les propriétés mécaniques de la cochlée.

5.1.2.3. L'enregistrement des OEA

L'enregistrement des OEA s'effectue dans une pièce insonorisée grâce à une sonde placée dans le conduit auditif externe du patient. La sonde comporte un haut-parleur et un microphone (Figure 58). Le haut-parleur va permettre d'envoyer un stimulus sonore (p. ex. un clic) dans l'oreille et le microphone enregistre la réponse cochléaire : l'OEA. Le patient doit être calme et éviter les mouvements de mâchoires ainsi que les mouvements liés à la déglutition ou à la parole qui provoquent des bruits dans le conduit auditif. De plus, le conduit auditif ne doit pas être obstrué par du cérumen qui empêcherait la propagation du son stimulant et du son réémis.

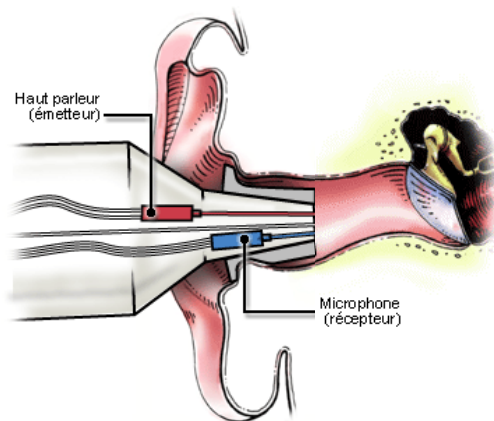


Figure 58 : Schéma d'une sonde intra auriculaire.

Dessin de S. Blatrix, extrait du site "Promenade autour de la cochlée" <http://www.cochlee.info/> par Pujol, Blatrix, & Pujol (1999). Montpellier.

L'intérêt majeur d'enregistrer ces OEA correspond à des applications cliniques car elles sont sensibles aux pathologies ou au dysfonctionnement cochléaire. Elles permettent de faire un diagnostic différentiel entre une cause centrale ou cochléaire et le plus important est qu'elles permettent d'éliminer une neuropathie auditive. Une autre application clinique importante est l'évaluation auditive chez les nouveau-nés. De plus, c'est une technique plus rapide et plus simple que l'enregistrement des réponses auditives du tronc cérébral en électroencéphalographie (ABR, *Auditory Brain-stem Response*). Mais dans certains cas d'atteinte neurologique, l'ABR reste essentielle. Au mieux, les réponses reflètent la résolution fréquentielle de la cochlée qui est autour de $\frac{1}{4}$ d'octave. L'examen des OEA n'est pas un test d'audition, c'est un test qui évalue le fonctionnement cochléaire. La relation entre l'intensité des OEA et le fonctionnement de la cochlée n'est pas corrélée car de nombreux facteurs peuvent modifier les OEA (la variabilité interindividuelle, la position de la sonde, la

physiologie interne) donc la chose importante est la détection d'OEA en réponse à un stimulus particulier plutôt que sa force. En augmentant l'intensité de la stimulation, les OEA vont devenir plus détectables et vont donc fournir plus d'informations utiles sur l'activité résiduelle des cellules ciliées mais ne donnent pas d'informations plus profondes sur les voies auditives. Ce sont des réponses pré-synaptiques, elles ne sont donc pas reliées aux seuils auditifs qui dépendent des mécanismes de transduction des cellules ciliées de l'oreille interne.

5.1.3. La mesure des effets du SEOCM à l'aide des OEAP

L'activité du SEOCM peut être évaluée de façon non-invasive au moyen des OEAP (Kemp, 1978). Les OEAP correspondent au fonctionnement mécanique des CCE de l'organe de Corti (Brownell, 1990). Or, le SEOCM se projette sur les CCE. Il est donc logique d'utiliser les OEAP pour explorer le SEOCM. L'effet le plus intéressant est l'effet de suppression contralatérale du SEOCM qui induit une diminution d'amplitude des OEA (0.5 à 3 dB) causée par le bruit continu ou des stimulations acoustiques transitoires appliquées dans l'oreille contralatérale (Collet et al., 1990 ; Velenovsky & Glatke, 2002). Cet effet est d'autant plus important que l'intensité du bruit contralatérale est élevée (Veillet, Collet, & Duclaux, 1991). Ce phénomène qualifié « d'interaction réciproque cochléaire », découvert par Collet et al. (1990), est médié par le SEOCM. Les fibres du SEOCM se projettent directement sur les CCE et joueraient un rôle dans le maintien effectif de l'état des CCE. Le SEOCM activé par une stimulation acoustique contralatérale agit donc sur la périphérie par l'intermédiaire des mécanismes cochléaires actifs, en inhibant la motilité des CCE (Davis, 1983 ; Kemp, 1979). Par conséquent, comme les CCE reçoivent directement des connexions neuronales du SEOCM contralatéral, la réduction des otoémissions a été attribuée au fonctionnement de ce système efférent (Collet et al., 1990 ; Veillet, Collet, & Duclaux, 1991). L'absence de cet effet de suppression contralatérale peut être le résultat d'une lésion du tronc cérébral mais Froehlich, Collet, Valatx et Morgon (1993) observent ce phénomène dans des étapes du sommeil et peut être absent chez certain individu en bonne santé. De plus, des corrélations entre l'effet de suppression contralatérale et des pathologies comme l'autisme et la dyslexie ont été mises en évidence (Khalifa, Bruneau et al., 2001 ; Veillet, Bazin, & Collet, 1999 ; Veillet, Khalifa, & Collet, 1999). Chez le sujet normo-entendant, les OEA reflètent l'amplification cochléaire et sont sous contrôle de l'activité du SEOCM qui diminue le gain de l'amplification cochléaire. De plus, le phénomène de compensation de la réduction du gain est possible si l'intensité du son émis augmente. L'amplification cochléaire est donc meilleure à faible intensité sonore et il en est de même pour l'effet du SEOCM. De plus,

l'activité du SEOCM peut influencer les CCE qui sont réparties de façon hétérogène le long de la cochlée et donc vont créer une irrégularité cochléaire qui va donc modifier l'amplitude des OEAPs.

La suppression controlatérale des otoémissions est une méthode objective et non invasive pour évaluer l'activité de rétrocontrôle (ou « feedback ») du SEOCM chez l'Homme. Pour quantifier la suppression périphérique, nous calculons l'atténuation équivalente (AE) utilisée classiquement dans les études (Chéry-Croze, Moulin, Collet, & Morgon, 1994 ; Collet, Veuillet, Bene, & Morgon, 1992).

5.1.4. La latéralisation cérébrale

Geschwind et Levitsky (1968) montrent une asymétrie des lobes temporaux droit et gauche sur des cerveaux sains *postmortem*. Cette asymétrie touche principalement le *planum temporale* qui se situe dans la région en arrière du gyrus de Heschl (ou gyrus temporal supérieur, STG). Le *planum temporale* est plus épais et plus long dans l'hémisphère gauche que dans l'hémisphère droit. Cette spécificité anatomique de l'hémisphère gauche rend compte de la spécificité de l'hémisphère gauche pour le langage. Au niveau du gyrus de Heschl se situe le cortex auditif primaire et au niveau du *planum temporale* s'observe les aires associatives auditives. Ces régions associatives auditives, à gauche, constituent l'aire de Wernicke qui a été identifiée grâce, notamment, à des études anatomiques chez des patients aphasiques, comme jouant un rôle fondamental dans les fonctions langagières. Les résultats de Geschwind et Levitsky (1968) montrent donc que cette région cérébrale est significativement plus grande dans l'hémisphère gauche et que cette observation anatomique est totalement en relation avec l'asymétrie fonctionnelle connue pour le langage (pour une méta-analyse des études sur l'hémisphère gauche, voir Vigneau et al., 2006).

Au niveau anatomique comme au niveau fonctionnel, une asymétrie est observée aussi bien pour la préférence manuelle que pour les processus cognitifs liés au langage. Les deux hémisphères droit et gauche semblent avoir des fonctions cognitives bien spécifiques. Bien que ces deux fonctions ne paraissent avoir aucun lien, une relation entre les deux a été démontrée. La majorité des droitiers présentent une forte spécialisation de l'hémisphère gauche pour le langage alors que pour les gauchers, les résultats sont beaucoup plus variables (Hécaen & Sauguet, 1971). Il semble donc que l'organisation fonctionnelle ainsi que les structures anatomiques des deux hémisphères ne soient pas une copie conforme de part et

d'autre du corps calleux (Josse, Hervé, Crivello, Mazoyer, & Tzourio-Mazoyer, 2006 ; Josse & Tzourio-Mazoyer, 2004 ; Newcombe & Ratcliff, 1973 ; Stephan et al., 2003).

L'hypothèse de Zatorre (Zatorre, Belin, & Penhune, 2002 ; Zatorre, Evans, Meyer, & Gjedde, 1992) montre une spécialisation hémisphérique dans le traitement du son. L'hémisphère gauche est plus sensible au décours temporel et contient plus de matière blanche. Les neurones ont des axones plus longs, plus larges donc plus myélinisés ce qui facilite la transmission qui est donc plus rapide. La résolution temporelle est donc meilleure. Par conséquent, l'hémisphère gauche serait spécialisé dans le traitement de l'information temporelle qui permet, notamment, la discrimination des phonèmes pour la compréhension du langage. Alors que l'hémisphère droit serait spécialisé dans le traitement de l'information spectrale ce qui comprend le traitement des fréquences qui fait partie d'un des aspects de la musique. L'hémisphère droit possède une tonotopie plus respectée et est plus sensible aux modulations de fréquences et à leur distribution spectrale. La discrimination fréquentielle est donc plus fine. Cependant, il n'existe pas d'asymétrie complète. En effet, dans le cas des langues tonales (comme le chinois), l'activation devrait être plus forte dans le cortex droit. Une expérience montre que le côté gauche est plus activé pour un sujet qui connaît la langue alors que pour un sujet qui ne connaît pas la langue, c'est le côté droit qui est plus activé.

5.1.5. L'asymétrie centrale auditive

Un bon moyen pour étudier les asymétries auditives est l'écoute dichotique, dans le silence et dans le bruit, en présentant de façon simultanée dans l'oreille gauche et droite deux signaux de parole différents. En écoute dichotique, la performance porte sur le nombre de mots correctement perçus dans l'oreille testée. Dans des expériences similaires où des signaux de parole sont utilisés, nous constatons un avantage de l'oreille droite (Schwartz & Tallal, 1980). En ajoutant du bruit au signal de parole, nous constatons également une asymétrie fonctionnelle du traitement central de la parole. Cependant, une inversion de l'avantage aurale peut être observée. Ainsi, le masquage de signaux de parole par du bruit pourrait modifier la latéralisation du traitement de la parole.

Les fibres du SEOCM qui prennent leur origine dans le complexe olivaire supérieur ipsilatéral (système non croisé) présentent un pattern asymétrique fonctionnel (Morlet et al., 1999) covariant avec le genre et la latéralité manuelle (Khalfa et al., 2000 ; Khalfa, Veillet, & Collet, 1998) qui semble absent chez les schizophrènes (Veillet et al., 2001). Or, le système auditif périphérique est latéralisé. Par conséquent, chez les sujets normo-entendants droitiers, le système efférent médian non croisé droit est plus efficace (inhibiteur) que le

gauche. Ainsi, la périphérie reflèterait les asymétries centrales. La latéralisation à gauche du langage et la latéralisation du SEOCM à droite permet de suggérer un lien entre les performances langagières et les performances du SEOCM. Par conséquent, l'hypothèse d'un déficit du SEOCM chez les personnes dyslexiques a été étudiée (Veillet, Bazin, & Collet, 1999 ; Veillet, Magnan, & Ecalle, 2004 ; Veillet, Magnan, Ecalle, Thai-Van, & Collet, 2007). De manière générale, le fonctionnement cortical anormal résulte en un feedback cortical anormal sur le tronc cérébral et la cochlée. Le dysfonctionnement du SEOCM qui est sous le contrôle en partie du cortex auditif reflèterait donc ces altérations. L'activité de ce SEOCM est particulièrement explorée dans l'étude de pathologie du langage comme la dyslexie, car il pourrait jouer un rôle dans les déficits de perception de parole notamment dans le bruit (Giraud et al., 1997). Un SEOCM efficace améliorerait la capacité d'intelligibilité de la parole dans le bruit, en inhibant les réponses des fibres au bruit continu et donc ces fibres deviendraient plus sensibles au bruit complexe tel que la parole. Ce phénomène est lié à un mécanisme d'anti-masquage. Grâce à une augmentation du rapport signal/bruit, il pourrait permettre une meilleure perception des sons complexes (Giraud et al., 1997) et une amélioration de la discrimination en milieu bruité (Micheyl & Collet, 1996). Les mécanismes neuronaux impliqués dans l'intelligibilité de la parole dans le bruit ne sont pas encore bien identifiés mais le SEOCM pourrait être un bon candidat.

Les potentiels évoqués sont le reflet de la réponse neuronale à des stimuli de l'environnement, ils sont impliqués dans le codage des indices acoustiques de la parole et ils expriment la synchronisation neuronale. Le bruit altère donc la morphologie temporelle de l'onde ce qui induit que le bruit désynchronise de manière importante la réponse auditive chez les enfants ayant des troubles d'apprentissage. Shtyrov et al. (1998) étudient la déviation acoustique entre le /pa/ et le /ka/ à l'aide d'un marqueur électrophysiologique auditif, la MisMatch Negativity (MMN). Ils observent une inversion de la distribution de la MMN selon que la tâche est réalisée dans le silence ou dans le bruit : la MMN est plus importante dans l'hémisphère gauche dans une condition silencieuse alors que l'activation est plus importante à droite dans le cas d'un bruit moyen. Il existe donc des arguments électrophysiologiques en faveur d'une modification de la latéralisation centrale du traitement des signaux de parole quand ils sont présentés dans du bruit. De même, l'asymétrie centrale auditive a été étudiée dans le cadre de pathologies diverses. Par exemple, des potentiels évoqués cérébraux anormaux et diminués ont été observés en réponse à des stimuli de parole présentés dans le bruit chez des enfants avec des problèmes d'apprentissage de la lecture (Cunningham, Nicol, Zecker, Bradlow, & Kraus, 2001). Chez les enfants ayant des déficits du traitement auditif, les

méthodes d'entraînement ont fait leur preuve, leur résistance au bruit est améliorée (Hayes, Warrier, Nicol, Zecker, & Kraus, 2003 ; Russo, Nicol, Zecker, Hayes, & Kraus, 2005).

5.2. Problématique et Hypothèses

De nombreuses études ont exploré les déficits de traitement de la parole de populations avec un trouble spécifique du langage (SLI) et de dyslexiques, dans lesquelles nous pouvons reconnaître un trouble auditif (en anglais : *Auditory Processing Disorder*, APD). Les populations APD sont décrites comme ayant un déficit de traitement auditif malgré des seuils auditifs normaux. Ces études ont montré une relation entre différents déficits de traitement auditif et, d'une part, des difficultés perceptives et d'autre part, des mesures neurophysiologiques : un déficit de traitement auditif temporel, des difficultés de perception auditive dans le bruit, des représentations et une discrimination anormales des traits phonétiques, un déficit de traitement binaural et une plasticité cérébrale liée à un entraînement (pour une revue voir Banai & Kraus, 2006).

Dans le cas de la dyslexie, des études explorant le SEOCM ont montré un dysfonctionnement du SEOCM reflétant une asymétrie centrale différente (Veillet, Bazin, & Collet, 1999 ; Veillet, Magnan, & Ecalle, 2004). De plus, le fonctionnement anormal du SEOCM a été relié à une sensibilité particulière au tait de voisement chez les dyslexiques suggérant une organisation anormale des représentations des traits phonétiques responsables de leur mauvaise perception de la parole (Veillet, Magnan, Ecalle, Thai-Van, & Collet, 2007). De plus, comme nous venons de le mentionner dans l'introduction, des études ont montré l'implication du SEOCM dans la perception de la parole dans le bruit (Giraud et al., 1997 ; Kumar & Vanaja, 2004).

L'ensemble de ces recherches sur le SEOCM, nous a amené à explorer le fonctionnement du SEOCM chez des adultes dyslexiques. Nous nous posons la question de savoir si le SEOCM est également impliqué dans la perception de la parole lorsque celle-ci est compressée temporellement. Suite aux résultats du Chapitre 4, nous avons cherché à expliquer les différences de perception de la parole compressée reflétant des conditions d'écoute difficiles chez les adultes dyslexiques comparés aux contrôles. Nos expériences précédentes nous ont permis d'apporter des informations supplémentaires en faveur de l'hypothèse d'un déficit de traitement auditif temporel à l'origine de la dyslexie. Par conséquent, une étude plus approfondie du système auditif des dyslexiques nous paraît pertinente pour apprendre davantage sur le déficit auditif temporel observé dans ce groupe. Pour tenter de répondre aux questions suivantes, nous allons procéder à l'exploration des voies auditives descendantes chez un groupe de dyslexiques adultes et chez un groupe contrôle. L'exploration du SEOCM

est une méthode facile, non invasive et objective qui nous permettra : (1) de comparer le fonctionnement du SEOCM entre les deux groupes, (2) de mettre en lien le fonctionnement de leur SEOCM avec leurs performances à des tests psychométriques et (3) aux performances d'identification de la parole compressée (Expériences 1 et 2).

Nous émettons l'hypothèse générale selon laquelle il existerait un fonctionnement atypique du SEOCM chez les dyslexiques adultes qui pourrait traduire leurs difficultés de perception de la parole. Le SEOCM reflète le fonctionnement du système auditif central donc si le SEOCM est dégradé cela reflèterait un trouble auditif chez les dyslexiques pouvant être à l'origine de leur mauvaise perception de la parole. Un dysfonctionnement des connexions feedback du système efférent chez les dyslexiques seraient corrélé à leurs troubles de perception de la parole compressée.

Nos hypothèses sont les suivantes :

- Nous attendons des différences significatives entre les dyslexiques et leurs contrôles pour les différentes mesures d'évaluation du système efférent : une différence d'amplitude des otoémissions et de suppression controlatérale des OEAP, ainsi qu'un pattern asymétrique droite/gauche différent.
- Nous émettons l'hypothèse selon laquelle il existerait une corrélation entre les mesures du SEOCM et la sévérité des troubles de langage des dyslexiques mesurés par des tests psychométriques.
- De même, une corrélation entre le déficit dans la compréhension de la parole compressée chez les dyslexiques et le fonctionnement du SEOCM devrait être mise en évidence.

5.3. Partie Expérimentale

5.3.1. Participants

Vingt adultes dyslexiques âgés de 18 à 34 ans (9 hommes, moyenne d'âge = 24.3 ; écart-type = 5.8) étaient comparés à un groupe contrôle composé de vingt adultes âgés de 18 à 35 ans (9 hommes, moyenne d'âge = 24.4 ; écart-type = 5.6) appariés en sexe, en âge et en score de latéralité. Tous les participants étaient de langue maternelle française. Les critères d'inclusion des participants étaient de 3 ordres. Le premier critère était l'âge, ils devaient avoir entre 18 et 35 ans. Le second critère était leur préférence manuelle, ils devaient être droitiers. La préférence manuelle était mesurée grâce au test de latéralité manuelle d'Edinburgh (Oldfield, 1971) qui calcule un quotient de latéralité compris entre -100 et +100 (cf. Annexe 4). Les participants des deux groupes étaient tous droitiers avec un score supérieur ou égal à +70 (Habib et al., 1991). Le score de latéralité n'était pas significativement différent entre les deux groupes (moyenne dyslexiques = 89.5 ; écart-type = 10 / moyennes contrôles = 93.5 ; écart-type = 9.3 / Test t pour des échantillons indépendants, $t_{38} = -1.31$; $p = 0.2$). Le troisième critère était qu'ils devaient avoir une audition normale (audiométrie tonale et tympanométrie). Lorsque toutes ces conditions étaient remplies, les participants étaient inclus dans l'étude et passaient les tests audiométriques et les tests psychométriques.

5.3.2. Tests Audiométriques (critères d'inclusion)

Tous les tests audiométriques se sont déroulés dans le service d'Audiologie et d'Explorations Orofaciales de l'Hôpital Édouard Herriot de Lyon, dirigé par le Pr. Lionel Collet et ont été effectués par le Dr. Evelyne Veuillet. L'ensemble de ces tests durait environ deux heures et les participants étaient dédommagés. Durant l'examen audiologique, les participants étaient installés confortablement dans une pièce calme.

Les mesures audiométriques permettent de vérifier le fonctionnement normal du système auditif périphérique par une audiométrie tonale dans le silence et d'une tympanométrie. Puis, des mesures du système efférent ont été effectuées.

5.3.2.1. L'audiométrie tonale

Nous avons déjà décrit la méthode et la procédure de l'audiométrie tonale dans le Chapitre 3. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un audiomètre clinique à deux voies de

type Interacoustics AC 33, et d'un casque Telephonics TDH 39P. Pour cette étude, nous avons mesuré les seuils d'audition pour les fréquences suivantes : 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 et 8000 Hz. Une audition normale dans le silence, chez des personnes de moins de 30 ans, devrait correspondre à des seuils auditifs inférieurs à 20 dB HL entre 125 Hz et 8 kHz.

5.3.2.2. La tympanométrie

Méthode

Cet examen permet de mesurer l'élasticité du tympan et la présence d'un réflexe stapédien (contraction du muscle stapédien lié à l'étrier dans l'oreille moyenne) qui protège l'oreille interne en cas de surstimulation sonore. Le réflexe stapédien entre en jeu autour de 75 dB en moyenne. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un analyseur d'oreille moyenne Grason Stadler GSI33. La technique consiste à faire varier la pression à l'intérieur du conduit auditif externe par l'intermédiaire de l'appareil qui comporte un casque muni d'une sonde avec un bouchon permettant de fermer hermétiquement le conduit auditif externe.

Procédure

Chaque oreille est testée séparément. L'appareil mesure les variations morphologiques de la membrane tympanique vis-à-vis des variations de pression induites dans le conduit auditif externe. Ces deux variables sont représentées sur un tympanogramme (Figure 59).

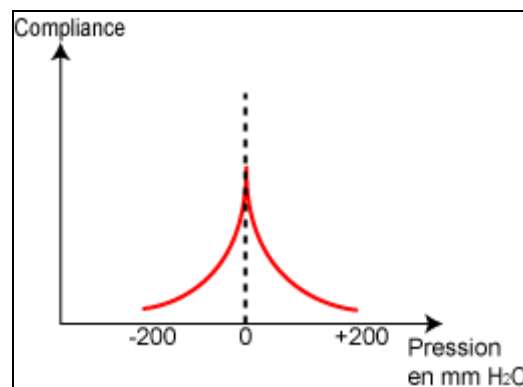


Figure 59 : Un tympanogramme normal (la compliance/ la souplesse de la membrane tympanique en fonction de la pression appliquée).

Le pic correspond à la souplesse maximale du tympan et doit apparaître lorsque la pression est la même de part et d'autre de la membrane tympanique. Si le pic est décalé, cela rend compte d'une anomalie tympanique pouvant être due à différentes causes (infections, otites). Le bon fonctionnement des oreilles moyennes de tous les sujets a donc été vérifié.

5.3.2.3. Résultats

Tous les participants vérifiaient les critères d'inclusion en audiométrie tonale avec des seuils auditifs inférieurs ou égaux à 20 dB HL pour les fréquences allant de 250 à 8000 Hz, ainsi qu'à l'examen tympanométrique qui montrait qu'aucun sujet ne possédait d'antécédent de pathologie auditive et que tous les sujets avaient un seuil de réflexe stapédien supérieur ou égal à 75 dB HL. Les mesures du système efférent ont donc pu être entreprises sur les 20 témoins et les 20 adultes dyslexiques.

5.3.3. Exploration fonctionnelle des voies auditives descendantes du système efférent

5.3.3.1. Méthode

La mesure des otoémissions, à l'aide de la sonde, se déroule en deux parties : la première permet de mesurer les *OEA spontanées* des sujets dans chaque oreille séparément. L'oreille droite puis l'oreille gauche sont mesurées, l'ordre d'enregistrement est aléatoire. Ensuite, nous enregistrons les *OEA provoquées*, en émettant un « clic » (1-4 kHz) dans l'oreille mesurée. Ce clic va activer les CCE et émettre un son enregistré par la sonde. Les OEAP ont ensuite été enregistrées selon la méthode de Bray et Kemp (1987), à l'aide du système Otodynamics Analyser ILO 88 (V. 3.92) (Figure 60).

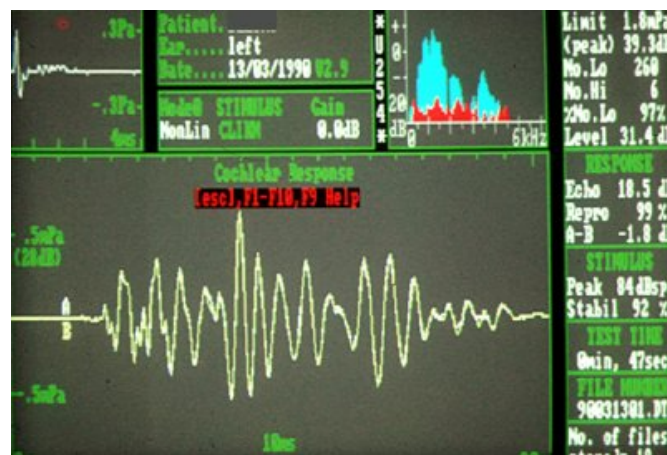


Figure 60 : Visualisation des réponses cochléaires à l'aide du système Otodynamics Analyser ILO 88.

5.3.3.2. Procédure

Les OEAP ont tout d'abord été mesurées en utilisant un clic non filtré dont l'intensité est comprise entre 80 et 83 dB SPL, dans les deux oreilles séparément afin d'évaluer l'amplitude et la qualité spectrale de la réponse. À ce stade, nous éliminons les participants qui ne présentent pas d'OEAP.

Le haut-parleur émet les clics durant 80 μ s à une fréquence de 50 Hz. Le microphone enregistre les réponses dans une fenêtre temporelle allant de 3.2 ms à 20 ms après l'émission des clics. La technique quantitative (Collet et al., 1990 ; Veuillet, Collet, & Duclaux, 1991) consiste en un recueil des OEA provoquées avec et sans bruit controlatéral (bruit blanc d'intensité constante 30 dB SL) en utilisant cinq intensités différentes pour le clic ipsilatéral déterminées en fonction de l'amplitude des réponses. L'ordre de présentation des cinq intensités était aléatoire et différent pour chaque oreille. Les intensités des stimuli étaient sélectionnées entre 54 et 72 dB parmi les intensités possibles par pas de 3 dB (54, 57, 60, 63, 66, 69 ou 72 dB). Ces intensités sont choisies entre le seuil d'apparition et l'amplitude de saturation des OEAP. L'oreille controlatérale était stimulée avec un bruit de type « speechoise » (spectre plat entre 500 et 2000 Hz puis baisse de 3 dB/octave) présenté 30 dB SL au-dessus du seuil auditif du participant. Les réponses ont été filtrées entre 500 Hz et 6 kHz. La stimulation controlatérale est émise via un casque (TDH39P) au moyen d'un AC40.

Ensuite, nous avons calculé la suppression controlatérale des OEAP dans chaque oreille (i. e. l'atténuation équivalente ou AE) et le quotient de latéralité (QL) pour chaque participant. L'AE (en dB) correspond à la variation d'intensité du clic ipsilatéral qui provoquerait une réduction d'amplitude des OEAP équivalente à celle causée par la présence d'une stimulation acoustique controlatérale. Plus l'AE est négative, plus le système efférent est fonctionnel. Le QL correspond à la différence d'AE entre les deux oreilles ($QL = AE_{OD} - AE_{OG}$) (voir Veuillet, Bazin, & Collet, 1999 pour une explication détaillée de la technique de calcul). Une valeur positive indique une prévalence de l'oreille gauche, une valeur négative indique que les fibres efférentes se projetant sur l'oreille droite sont plus inhibitrices que celles se projetant sur l'oreille gauche.

5.3.3.3. Résultats

Nous avons analysé les résultats concernant les OEAP tout d'abord, puis les résultats des AE et des QL. Une ANOVA à mesures répétées (STATISTICA) a été effectuée en prenant les sujets (F1) comme variable aléatoire. La variable dépendante (VD) est représentée par la

valeur d'amplitude des OEAP, par le taux calculé de l'AE et par la valeur du QL des participants.

Otoémissions acoustiques provoquées (OEAPs)

Une ANOVA à deux facteurs : Groupe (Témoins, Dyslexiques) et Oreille (Droite, Gauche) a permis de mettre en évidence deux effets principaux significatifs [Groupe : $F(1,19) = 5.89$, $p < .05$; Oreille : $F(1,19) = 4.77$, $p < .05$]. Les OEAPs enregistrées chez les dyslexiques ont une amplitude plus grande que chez les témoins (12.56 vs. 9.61 dB). De plus, les OEAPs dans l'oreille droite présentent une plus grande amplitude que celles obtenues l'oreille gauche, quelque soit le groupe (11.6 vs. 10.6 dB). L'effet de l'interaction Groupe x Oreille n'est pas significatif [$F(1,19) = 1.44$, $p = 0.24$]. Cependant, un test de Newman-Keuls de comparaison à postériori montre une différence significative d'amplitude des OEAPs entre les deux oreilles chez les témoins ($p < .01$) mais pas chez les dyslexiques ($p = 0.15$). Chez les témoins, l'amplitude des OEAPs est significativement plus grande dans l'oreille droite que dans l'oreille gauche (10.28 vs. 8.95 dB). Chez les dyslexiques, les OEAPs de l'OD sont équivalentes à celles de l'OG (12.87 vs. 12.24 dB) (Tableau 28 et Figure 61).

Tableau 28 : Résultats des tests t pour des échantillons indépendants (Témoins et Dyslexiques) pour les mesures audiométriques du système efférent (ns : non significatif, * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$). L'écart-type est entre parenthèses (σ).

	Témoins	Dyslexiques	t_{38}	p
OEAP Oreille Droite (dB)	10.28 (3)	12.87 (3.1)	-2.69	*
OEAP Oreille Gauche (dB)	8.95 (2.9)	12.24 (4.4)	-2.77	**
AE Oreille Droite (dB)	-2.64 (1.5)	-3.14 (2.4)	0.77	ns
AE Oreille Gauche (dB)	-1.78 (1)	-3.16 (2)	2.76	**
Quotient de Latéralité (QL)	-0.87 (1.3)	0.02 (1.4)	-2.06	*

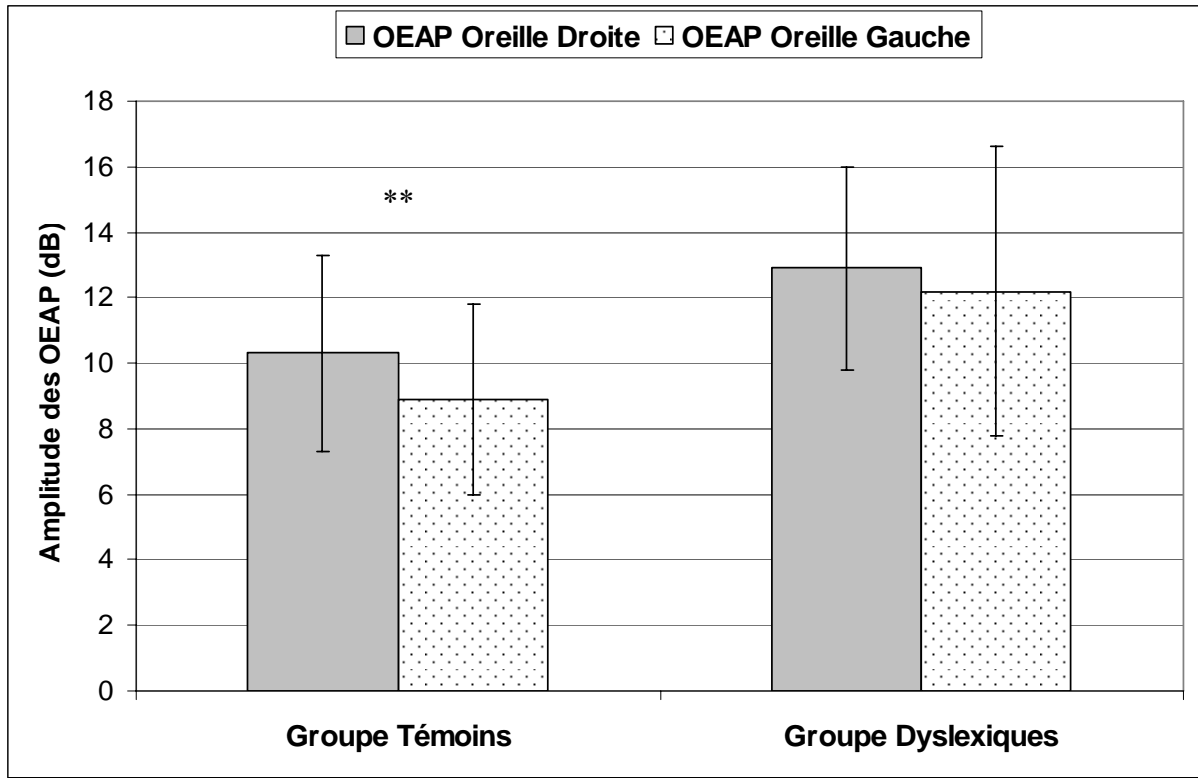


Figure 61 : Comparaison de l'amplitude des OEAP sur l'oreille droite et l'oreille gauche, entre le groupe témoins et dyslexiques (** $p < .01$).

Atténuation Équivalente (AE)

Une ANOVA à deux facteurs : Groupe (Témoins, Dyslexiques) et Oreille (Droite, Gauche) n'a pas mis en évidence d'effets principaux significatifs [Groupe : $F(1,19) = 3.36$, $p = 0.08$; Oreille : $F(1,19) = 3.07$, $p = 0.1$]. Par contre, nous avons observé un effet significatif de l'interaction entre le Groupe et l'Oreille [$F(1,19) = 5.71$, $p < .05$] qui rend compte d'une différence significative entre les valeurs d'atténuation équivalente entre l'oreille droite et gauche chez le groupe témoin ($AE_{OD} = -2.64$ dB, $AE_{OG} = -1.78$ dB ; $p < .01$) mais pas chez le groupe dyslexiques ($AE_{OD} = -3.14$ dB, $AE_{OG} = -3.16$ dB ; $p = 0.94$). De plus, nous pouvons noter, grâce à un test de Newman-Keuls de comparaison à postériori, qu'une différence significative est observée entre les deux groupes uniquement pour les valeurs d'AE de l'oreille gauche (-1.78 vs. -3.16 dB ; $p < .001$) et pas de l'oreille droite (-2.64 vs. -3.14 dB ; $p = 0.07$) (Tableau 28 et Figure 62).

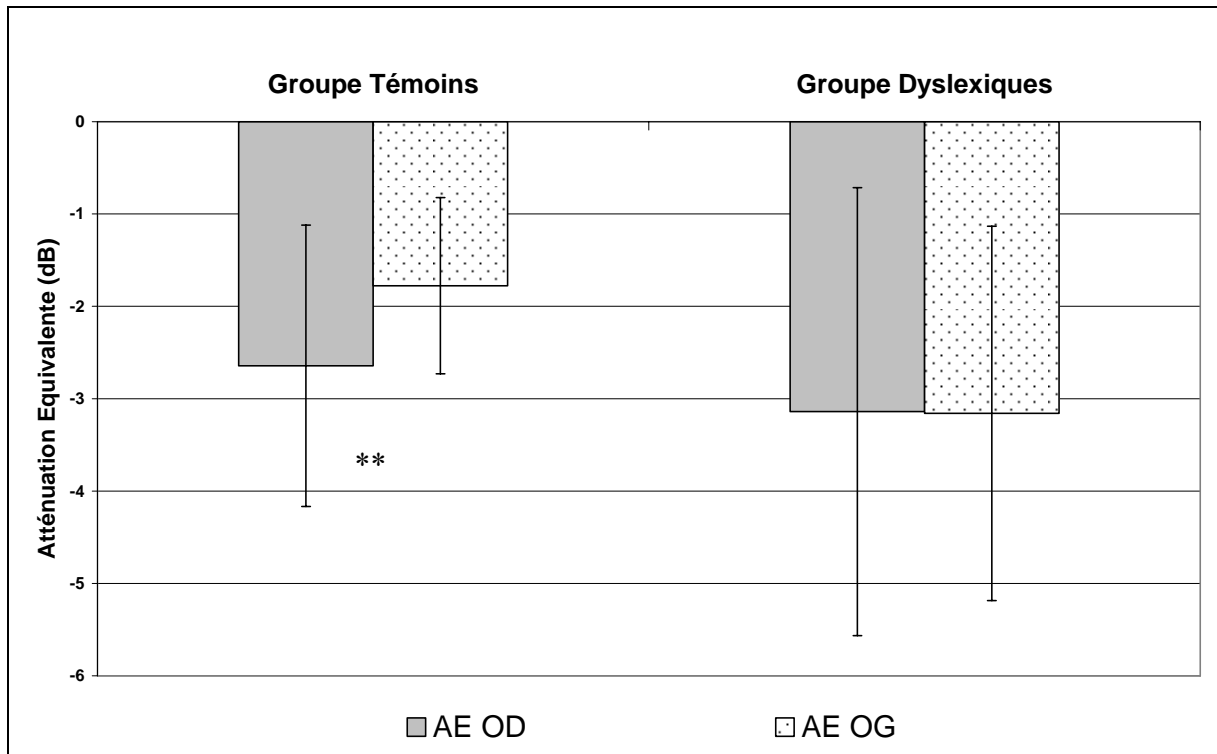


Figure 62 : Comparaison entre l'oreille droite et l'oreille gauche de la suppression des otoémissions acoustiques provoquées pour des adultes normo-lecteurs et des adultes dyslexiques (** $p < .01$).

Quotient de Latéralité (ou Indice d'Asymétrie)

Le QL correspond à la différence d'AE entre les deux oreilles ($QL = AE_{OD} - AE_{OG}$). Un test t pour des échantillons indépendants a été mené sur les valeurs de quotient de latéralité des deux groupes (Témoins et Dyslexiques). Le test montre une différence significative entre les deux groupes ($t_{38} = -2.06$; $p < .05$) : les témoins ont un QL négatif (-0.87 dB) alors que celui des dyslexiques est proche de zéro (0.02 dB) (Tableau 28 et Figure 63).

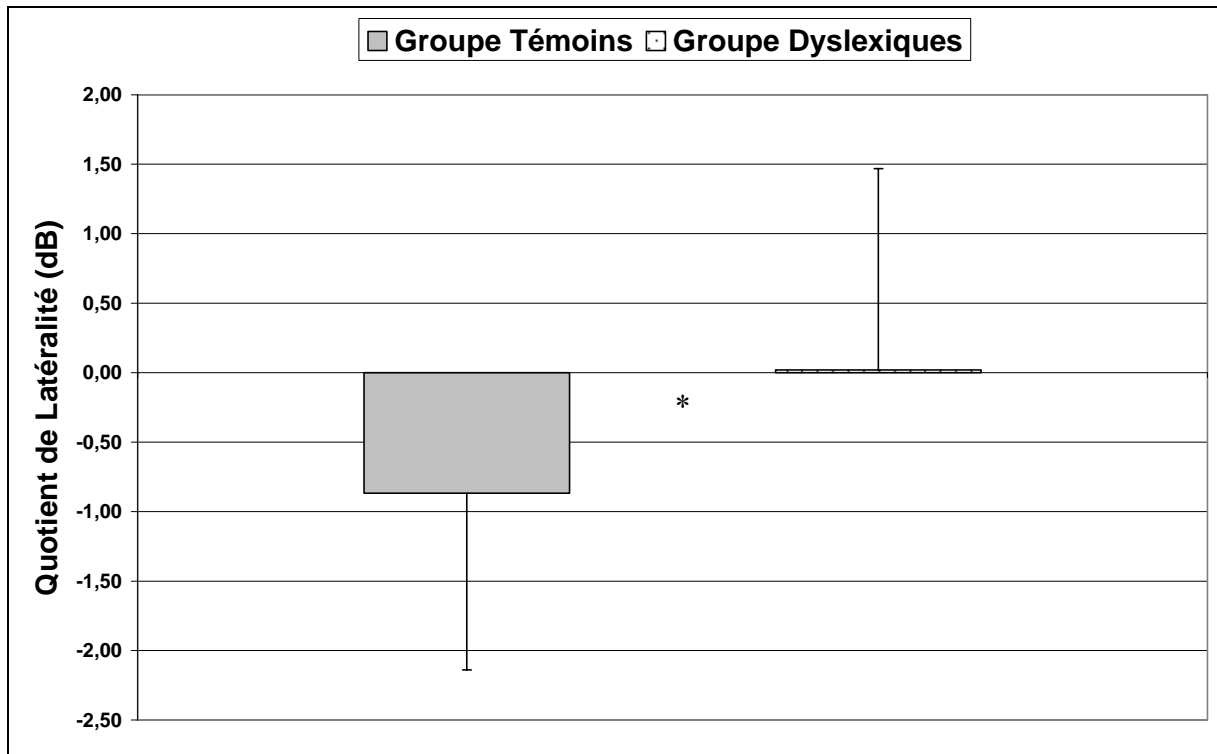


Figure 63 : Latéralisation du système auditif central pour le groupe témoins et le groupe dyslexiques (* $p < .05$).

À présent, nous regardons les valeurs de quotient de latéralité individuelles qui sont représentées sur la Figure 64. Cette figure montre que la majorité des témoins ont un indice d'asymétrie négatif (14/20) alors qu'ils ne sont que la moitié chez les dyslexiques. En effet, deux sous-groupes peuvent être distingués : un sous-groupe constitué de 10 dyslexiques ayant un indice d'asymétrie négatif et un autre sous-groupe avec 10 dyslexiques ayant un indice d'asymétrie positif. Le premier sous-groupe sera appelé « les dyslexiques droitiers (DLOD) » et le second, « les dyslexiques gauchers (DLOG) ». À partir de cette observation, nous étudions en détail ces deux sous-groupes pour tenter de trouver un facteur pouvant expliquer cette distinction dans notre population de dyslexiques.

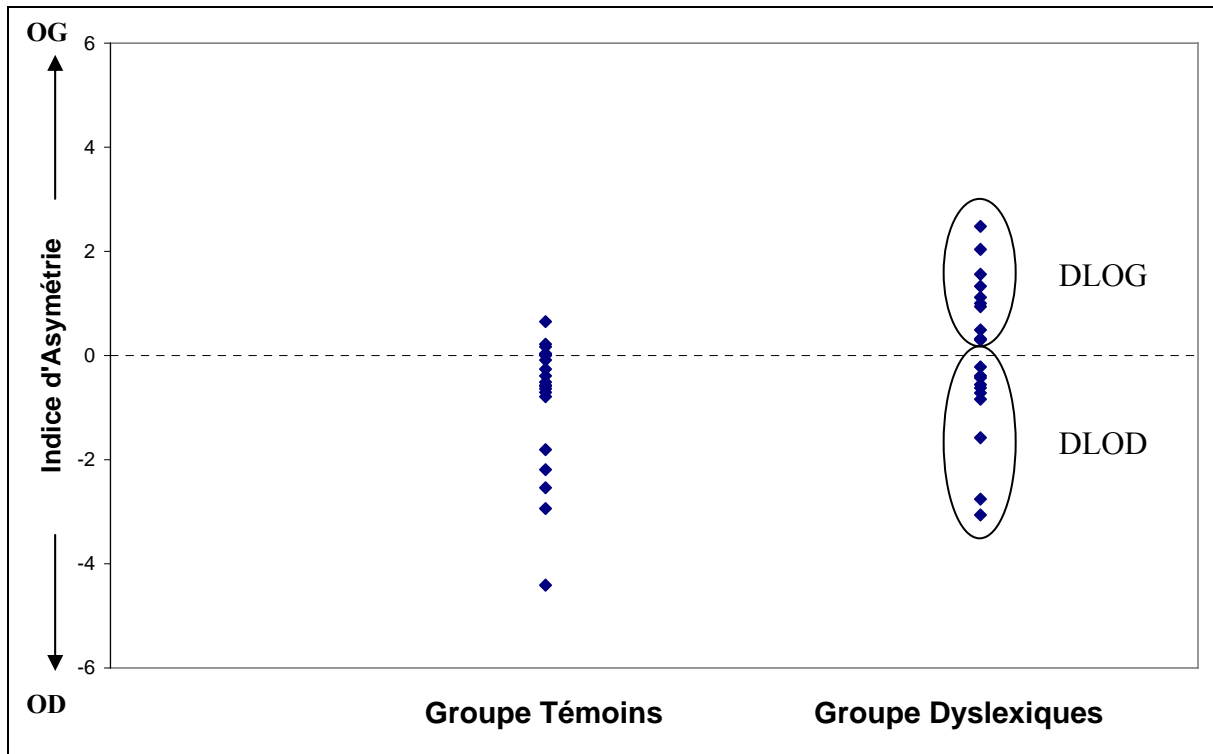


Figure 64 : Valeurs individuelles de la différence interaural chez les témoins et les dyslexiques.

Comparaison entre les deux sous-groupes de dyslexiques

Les sous-groupes de dyslexiques sont donc composés chacun de 10 individus. Le groupe DLOD comporte 5 femmes et 5 hommes âgés entre 18 et 34 ans (moyenne d'âge = 24 ans ; écart-type = 6.2) et le groupe DLOG rassemble 6 femmes et 4 hommes âgés entre 18 et 34 ans (moyenne d'âge = 24.5 ans ; écart-type = 5.8). Tous les participants étaient droitiers (DLOD = 89 et DLOG = 90 au test de latéralité manuelle d'Edinburgh). Les deux sous-groupes d'adultes dyslexiques ne se différencient significativement ni par le genre ($t_{18} = 0.43$; $p = 0.67$) ni par la moyenne d'âge ($t_{18} = -0.19$; $p = 0.85$) ni par la latéralité manuelle ($t_{18} = -0.22$; $p = 0.83$). Nous ré-analisons les mesures audiométriques en séparant les deux sous-groupes afin d'observer s'il existe des différences significatives entre les sous-groupes.

Quotient de Latéralité (Indice d'Asymétrie)

Un test t pour des échantillons indépendants a permis de mettre en évidence des différences significatives de l'Indice d'Asymétrie entre le groupe NL et le sous-groupe DLOG ($t_{28} = -4.65$; $p < .001$) et entre les sous-groupes DLOD et DLOG ($t_{18} = -5.78$; $p < .001$). Par contre, la différence entre le groupe NL et le sous-groupe DLOD n'est pas significative ($t_{28} = 0.54$; $p = 0.54$). Le groupe NL a un indice d'asymétrie négatif égal à -0.87 dB alors que

le groupe DLOG a un IA positif égal à 1.16 dB. Le groupe DLOD a un IA négatif égal à -1.12, légèrement supérieur à l'IA des NL, mais la différence n'est pas significative (Tableau 29 et Figure 65).

Tableau 29 : Mesures audiométriques du système efférent pour les trois groupes NL, DLOD et DLOG). L'écart-type est entre parenthèses (σ).

	NL	DLOD	DLOG
QL	-0.87 (1.3)	-1.12 (1)	1.16 (0.7)
AE OD (dB)	-2.64 (1.5)	-3.59 (2.7)	-2.69 (2.2)
AE OG (dB)	-1.78 (1)	-2.47 (1.9)	-3.85 (2)
OEAP OD (dB)	10.28 (3)	13.09 (3.2)	12.65 (3)
OEAP OG (dB)	8.95 (2.9)	12.83 (5.6)	11.65 (3.1)

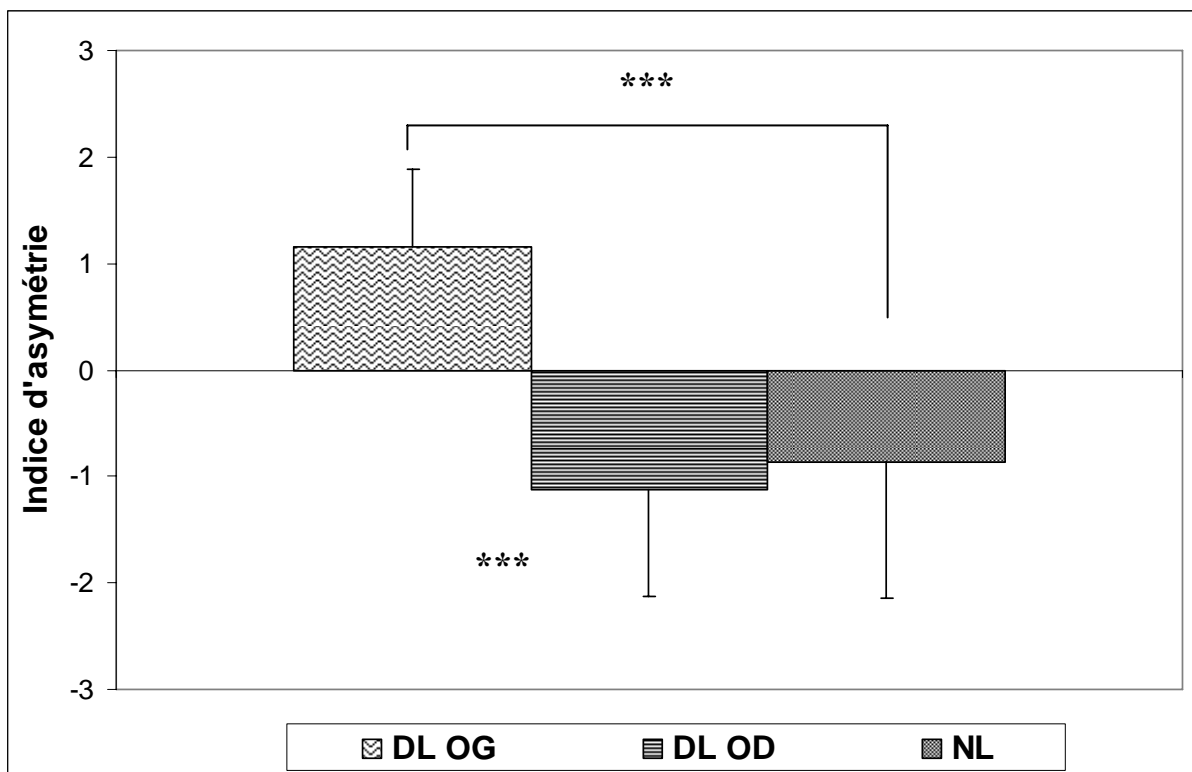


Figure 65 : Latéralisation du système efférent pour le groupe NL, DLOD et DLOG (***) $p < .001$).

Atténuation Équivalente

Une ANOVA à 1 facteur (Oreille : droite et gauche), sur les valeurs d'AE pour les trois groupes (facteur inter-sujet), n'a pas mis en évidence des effets principaux de Groupe, ni d'Oreille [Groupe : $F(2,37) = 1.56$, $p = 0.22$; Oreille : $F(1,37) = 2.26$, $p = 0.14$]. Par contre,

l'effet de l'interaction entre le Groupe et l'Oreille est significatif [$F(2,37) = 13.96$; $p < .001$]. Un test Newman-Keuls de comparaison à postériori montre une différence significative entre les AE OD et les AE OG pour les trois groupes (NL : $p < .05$; DLOD : $p < .01$ et DLOG : $p < .01$) (Figure 66). Les groupes NL et DLOD ont des AE de l'oreille droite supérieures à celles de l'oreille gauche (NL : -2.64 vs. -1.78 dB ; DLOD : -3.59 vs. -2.47 dB). Alors que l'on observe l'inverse pour le groupe DLOG, l'AE de l'oreille droite est inférieure à celle de l'oreille gauche (-2.69 vs. -3.85 dB). Par ailleurs, l'AE de l'oreille droite et de l'oreille gauche du groupe DLOD sont significativement plus élevées que celles du groupe NL (OD : -3.59 vs. -2.64 dB ; $p < .01$ et OG : -2.47 vs. -1.78 dB ; $p < .05$) (Tableau 29). En ce qui concerne le groupe DLOG, l'AE OD n'est pas significativement différente de celle du groupe NL (-2.69 vs. -2.64 dB ; $p = 0.89$) alors que l'AE OG a une amplitude plus grande (-3.85 vs. -1.78 dB ; $p < .001$). Entre les deux sous-groupes de dyslexiques, des différences significatives apparaissent également pour les deux oreilles, du fait, principalement de l'inversion des AE. Par conséquent, l'AE OD et AE OG du groupe DLOG sont significativement différentes de celles du groupe DLOD ($p < .01$) (Tableau 29 et Figure 66).

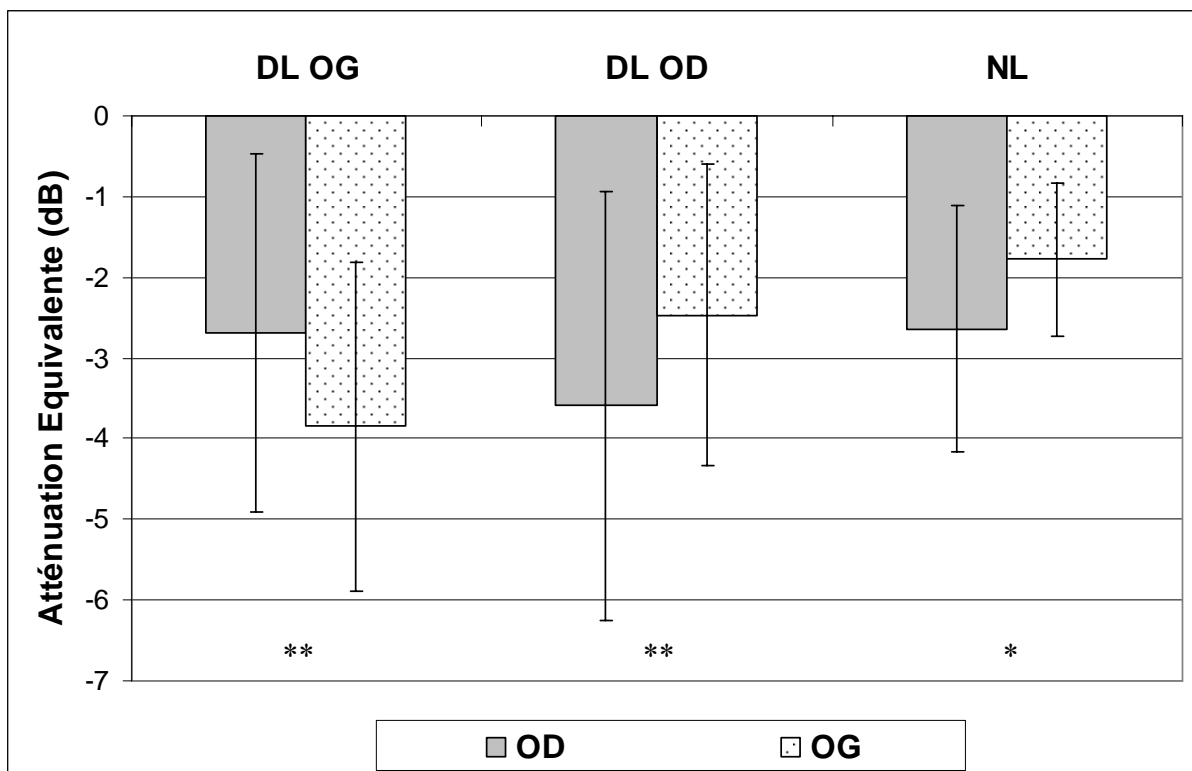


Figure 66 : Comparaison entre l'oreille droite et l'oreille gauche de la suppression des otoémissions acoustiques provoquées pour les groupes NL, DLOD et DLOG (** $p < .01$, *** $p < .001$).

Amplitude des OEAP

Une ANOVA à 1 facteur (Oreille : droite et gauche), sur les valeurs d'OEAP pour les trois groupes (facteur inter-sujet), a mis en évidence des effets principaux du Groupe et de l'Oreille [Groupe : $F(2,37) = 4.30$, $p < .05$; Oreille : $F(1,37) = 4.60$, $p < .05$]. L'effet de l'interaction Groupe*Oreille n'est pas significatif [$F(2,37) = 0.66$, $p = 0.52$]. Un test LSD de comparaison à postériori met en évidence une différence significative entre les OEAP OD et les OEAP OG uniquement pour le groupe témoins (NL : $p < .01$; DLOD : $p = 0.74$ et DLOG : $p = 0.20$) (Figure 67). Les OEAP des deux groupes de dyslexiques sont significativement plus amples que celles du groupe NL, et ce, pour les deux oreilles ($p < .001$, pour toutes les comparaisons).

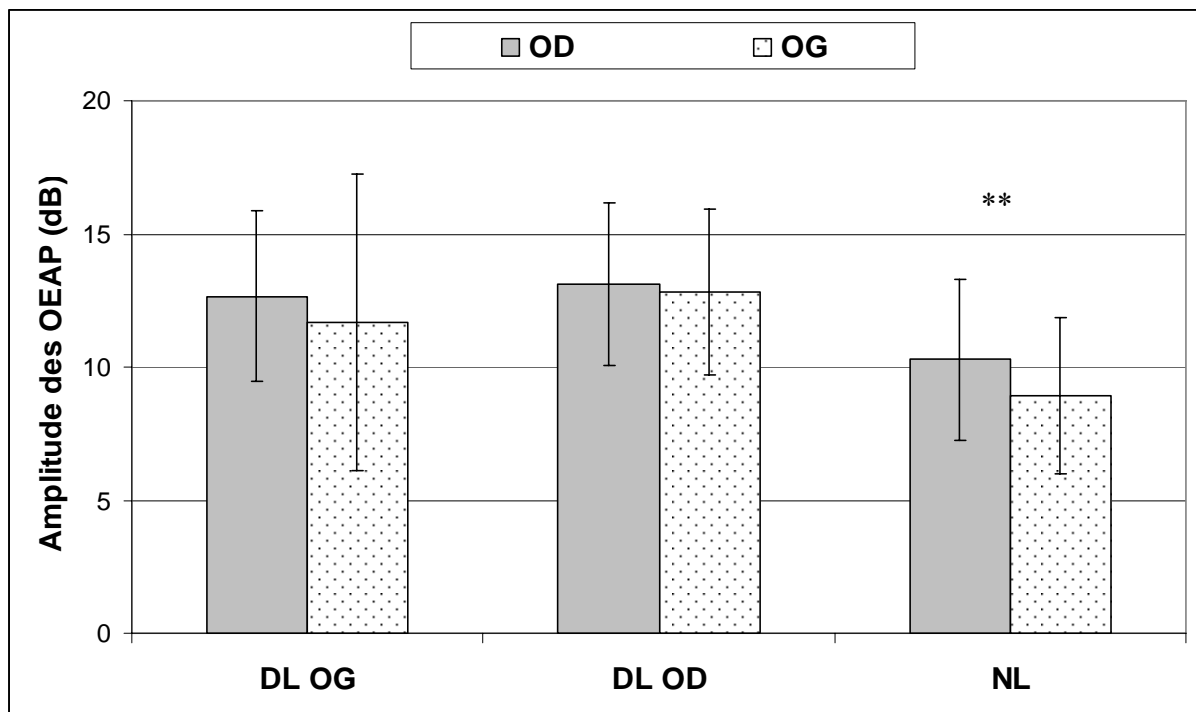


Figure 67 : Mesures de la présence et de la qualité des OEAP chez les groupes NL, DLOD et DLOG (** $p < .01$).

Corrélation entre l'amplitude des OEAPs et la suppression controlatérale

Une corrélation négative significative a été observée chez les NL entre l'amplitude des OEAPs et l'atténuation équivalente dans l'oreille droite ($r = -0.57$, $p < .01$) mais pas dans l'oreille gauche ($r = -0.18$, $p = 0.46$). Pour les groupes de dyslexiques nous n'avons pas observé de corrélations ni pour l'oreille droite (DLOD : $r = 0.25$, $p = 0.14$; DLOG : $r = -0.46$, $p = 0.18$) ni pour l'oreille gauche (DLOD : $r = 0.17$, $p = 0.63$; DLOG : $r = 0.20$, $p = 0.59$).

L'amplitude des OEAPs de l'oreille droite des NL est plus importante lorsque l'AE OD est plus forte (Figure 68).

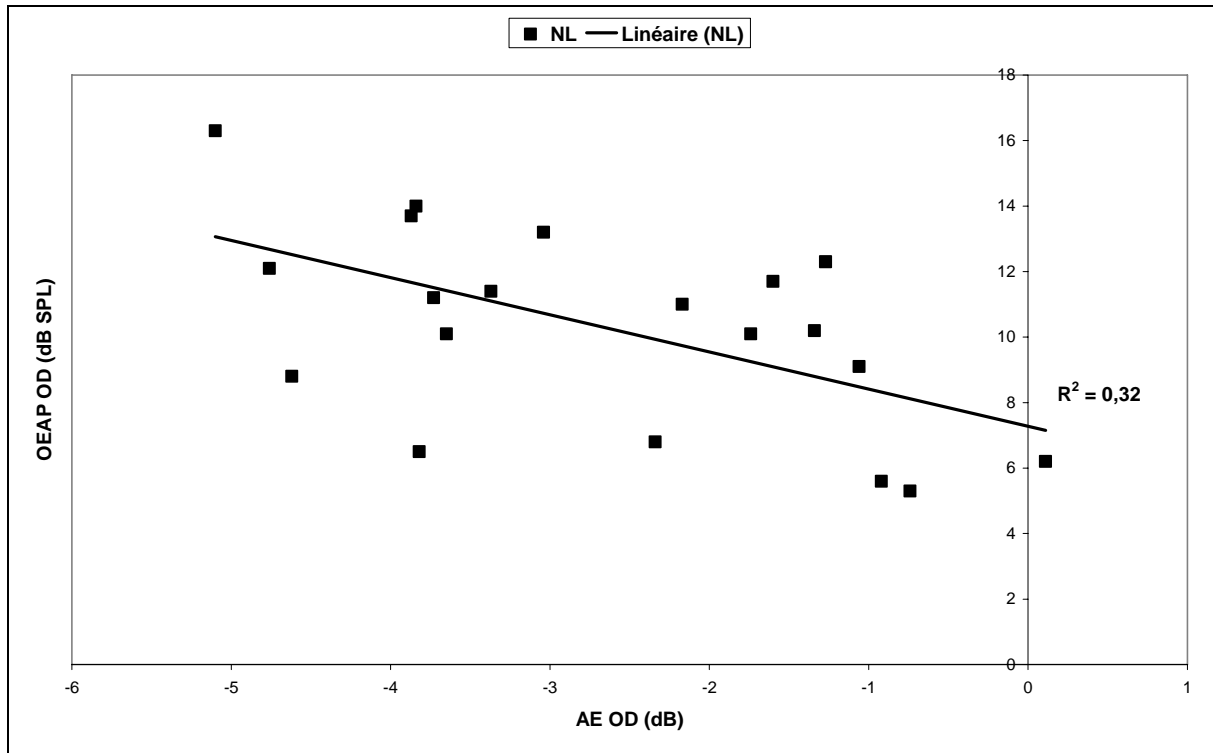


Figure 68 : Corrélation entre l'amplitude des OEAP et l'atténuation équivalente (AE) de l'oreille droite (OD) pour le groupe contrôle (NL) (Courbe de tendance linéaire).

5.3.3.4. Discussion

L'observation des valeurs individuelles du quotient de latéralité pour les deux groupes a permis de mettre en évidence deux sous-groupes parmi les 20 dyslexiques adultes testés. Les deux sous-groupes ne se différencient pas ni pour le genre, ni pour l'âge des dyslexiques. Les sous-groupes se distinguent par l'asymétrie du système efférent. Le sous-groupe DLOD a un quotient de latéralité négatif, comme les témoins, les DLOD ont montré une prévalence de l'oreille droite. Alors que le sous-groupe DLOG a un quotient de latéralité positif en faveur d'une prévalence de l'oreille gauche. Les trois groupes présentent une asymétrie du système efférent. Les groupes NL et DLOD présentent un système efférent plus inhibiteur à droite qu'à gauche alors que l'inverse est observé pour le groupe DLOG. L'asymétrie du SEOCM pour le sous-groupe DLOG est inversée, le système efférent gauche est plus inhibiteur que le droit.

L'amplitude des OEAP

Les dyslexiques présentent des otoémissions acoustiques provoquées (OEAPs) de plus large amplitude que les normo-lecteurs. L'étude de Veillet, Collet, et Bazin (1999) montre des amplitudes d'OEAPs plus petites chez des enfants avec des troubles d'apprentissage du langage que chez les contrôles. Ils suggèrent que cela serait le résultat d'un dysfonctionnement auditif périphérique malgré des seuils auditifs normaux. Nos résultats indiquent l'inverse pour les deux sous-groupes de dyslexiques. Nous suggérons donc un fonctionnement anormal du SEOCM dans les deux sous-groupes de dyslexiques. Muchnik et al. (2004) observent également une amplitude plus élevée des OEAPs chez des enfants APD (*Auditory Processing Disorder*). Ils expliquent leurs résultats à partir d'une étude sur des chinchillas (Kakigi, Hirakawa, Mount, & Harrison, 1997). Une section du SEOCM entraîne une augmentation de l'amplitude des OEAPs chez les chinchillas. Les auteurs suggèrent que cela rend compte d'une absence de contrôle inhibiteur du SEOCM sur les CCE. Les dyslexiques présentent donc une réponse auditive différente des CCE due à un SEOCM qui n'est pas fonctionnel.

Seuls les témoins présentent de meilleures OEAP pour l'OD, les deux sous-groupes de dyslexiques présentent des amplitudes d'OEAP équivalentes à droite et à gauche. Les deux oreilles répondent de la même manière à la stimulation ipsilatérale. Les CCE des deux oreilles répondent donc avec la même amplitude chez les dyslexiques. Ces résultats mettent en évidence des mécanismes actifs cochléaires plus intenses dans les deux oreilles chez les dyslexiques alors que chez les normo-lecteurs, la réponse des CCE est prédominante dans l'oreille droite. Nous suggérons que le contrôle de l'électromotilité par le système efférent est perturbé chez les dyslexiques d'où la forte amplitude des réponses des CCE. Les résultats de nos témoins sont en accord avec l'étude Khalfa, Morlet, Micheyl, Morgon et Collet (1997) qui a montré chez 70 jeunes droitiers une prévalence à droite de l'amplitude des OEAP. Cette asymétrie des OEAP pourrait refléter une latéralisation des mécanismes cochléaire actifs reflétés par l'activité contractile des CCE (Brownell, 1990). Les CCE peuvent être plus efficaces ou plus nombreuses à droite pour les témoins et équivalentes des deux côtés pour les dyslexiques. Khalfa et al. (1997) suggèrent que cette asymétrie fonctionnelle cochléaire puisse être liée à une plus forte vulnérabilité de l'oreille gauche aux dommages auditifs, l'oreille gauche est la plus susceptible de présenter des pertes auditives (Axelsson, Jerson, Lindberg, & Lindgren, 1981 ; Glorig, 1958). De nombreux travaux montrent un rôle fonctionnel modulateur du SEOCM sur la périphérie auditive (Giard, Collet, Bouchet, & Pernier, 1994 ;

Khalifa, Bougeard et al., 2001 ; Khalifa & Collet, 1996 ; Khalifa, Micheyl, Veuillet, & Collet, 1998 ; Maison, Durrant, Gallineau, Micheyl, & Collet, 2001 ; Micheyl, Perrot, & Collet, 1997 ; Perrot, Micheyl, Khalifa, & Collet, 1999). Une diminution des amplitudes OEAPs traduit une inhibition des mécanismes cochléaires actifs via les CCE (Collet et al., 1990 ; Collet, Veuillet, Bene, & Morgon, 1992 ; Giraud, Collet, Chéry-Croze, Magnan, & Chays, 1995 ; Veuillet, Collet, & Duclaux, 1991). Il existe un rétrocontrôle rapide des aires corticales auditives sur le fonctionnement cochléaire controlatéral via le SEOCM (Huffman & Henson, 1990 ; Xiao & Suga, 2002). Ce rétrocontrôle rapide pour être défaillant chez les dyslexiques ce qui expliquerait nos résultats.

La suppression controlatérale

L'amplitude des OEAPs pour les deux groupes (témoins et dyslexiques) diminuent avec la stimulation acoustique controlatérale. L'atténuation équivalente (AE) est mesurée suite à l'émission d'un bruit controlatéral, ce qui induit une réduction des OEAPs dans l'oreille enregistrée. En effet, les voies auditives descendantes étant croisées, le bruit controlatéral va activer le système efférent de l'oreille ipsilatérale et va ainsi inhiber la réponse électromotile des CCE du côté où sont mesurées les OEAPs. Par conséquent, l'AE correspond à la différence entre la mesure des OEAPs sans stimulation controlatérale et les OEAPs avec la stimulation controlatérale. Nous obtenons ainsi l'effet de suppression du système efférent. Les dyslexiques montrent une réponse inhibitrice plus importante que les témoins : leurs mesures d'AE sont plus grandes que celles des témoins signifiant que leur SEOCM serait plus fonctionnel. De plus, contrairement aux témoins qui présentent une AE plus forte dans l'oreille droite, chez les dyslexiques nous n'observons pas de différences des AE entre les deux oreilles. Ce résultat correspond en réalité à la somme des mesures inverses des deux sous-groupes de dyslexiques. En effet, les deux sous-groupes de dyslexiques présentent des patterns asymétriques différents. Alors que le groupe DLOD montre une AE plus importante de l'oreille droite que de l'oreille gauche, et ce, plus importante que le groupe NL, le groupe DLOG présente une AE de l'oreille gauche plus large que l'oreille droite. La fonctionnalité du système efférent chez les DLOD et les DLOG semble différemment latéralisée. Le système efférent droit est plus inhibiteur que le gauche pour le groupe DLOD alors que le système efférent gauche est plus inhibiteur pour le groupe DLOG. Ce dernier résultat est en accord avec l'étude de Veuillet, Collet, et Bazin (1999) qui démontre en premier un

dysfonctionnement du SEOCM chez les enfants ayant des troubles d'apprentissage du langage (Learning Impaired children, LI). Les LI présentaient une AE de l'oreille gauche plus importante que celle de l'oreille droite contrairement aux contrôles. Par contre, les résultats montrent que la suppression contralatérale de l'oreille droite du groupe contrôle est meilleure que celle du groupe LI, nous ne retrouvons pas cette différence significative dans notre étude. Par contre, nous pouvons remarquer que le groupe DLOD a de meilleurs systèmes efférents droit et gauche (hyperactivité) que les témoins.

Nos résultats mettent en évidence un trouble particulier du traitement auditif inhibiteur impliquant les fibres du SEOCM qui se projettent sur la cochlée droite. Dans notre étude, nous avons sélectionné des participants droitiers uniquement car d'après l'étude de Khalifa et al. (1998), le SEOCM est caractérisé par une asymétrie fonctionnelle liée à la latéralité manuelle. Les adultes droitiers montrent un avantage de l'oreille droite pour le fonctionnement du SEOCM (Khalifa & Collet, 1996) alors que cette asymétrie n'existe pas chez les gauchers (Khalifa, Veuillet, & Collet, 1998). La latéralisation corticale des gauchers est moins importante (Hécaen & Sauguet, 1971). Les auteurs émettent l'hypothèse selon laquelle le pattern asymétrique de l'activité du SEOCM est lié à une asymétrie plus centrale. Nos résultats sont donc surprenants car nous nous attendions à observer une prévalence de l'oreille droite pour tous nos participants. Une latéralisation hémisphérique anormale liée à un pattern asymétrique du système efférent a été observée chez des enfants présentant des troubles d'apprentissage du langage (Veuillet, Bazin, & Collet, 1999) et chez des autistes (Khalifa, Bruneau et al., 2001). La latéralité de l'effet de suppression est controversée : alors que des auteurs trouvent une prévalence à droite (Khalifa & Collet, 1996), d'autres observent le même effet pour les deux oreilles (Giraud, Collet, Chéry-Croze, Magnan, & Chays, 1995 ; Muchnik et al., 2004). Nos résultats montrent une prévalence de l'oreille droite pour les groupes NL et DLOD, à l'inverse, une prévalence de l'oreille gauche pour le groupe DLOG.

La latéralisation du système efférent

Comme nous l'avons dit précédemment, la mesure du quotient de latéralité a permis de distinguer les sous-groupes de dyslexiques. Le quotient de latéralité des témoins est négatif, ainsi que celui du groupe DLOD, par contre le quotient de latéralité du groupe DLOG est positif. Lorsque le QL est positif, cela signifie que l'oreille gauche a des AE plus importantes alors que lorsque le QL est négatif, cela correspond à une prévalence de l'oreille droite pour les AE. Les témoins et les DLOD ont donc une prévalence des AE à droite ce qui indique que

le système efférent droit est plus inhibiteur que le gauche. Par contre, les DLOG montrent asymétrie fonctionnelle inverse c'est-à-dire que la fonctionnalité du SEOCM est supérieure à gauche qu'à droite. Le fonctionnement latéralisé du SEOCM à droite pour le groupe témoin et le groupe DLOD devrait être relié aux performances des participants aux tests d'évaluation des capacités cognitives. En effet, les voies auditives sont croisées donc le stimulus auditif reçu dans l'oreille droite est intégré par les aires corticales auditives dans l'hémisphère gauche, où se situe le *planum temporale* qui reçoit les projections auditives directes du noyau géniculé médian, qui joue un rôle primordial dans le langage. Geschwind et Levitsky (1968) ont mis en évidence une asymétrie du *planum temporale* (PT) : le PT était plus grand à gauche dans 65% des cerveaux sains étudiés *post mortem*. Comme il existe des influences anatomiques entre le cortex auditif et la cochlée via le SEOCM (Huffman & Henson, 1990), il peut être raisonnablement supposé que des dysfonctionnements du SEOCM puissent refléter des anomalies plus centrales. Par contre, nos dyslexiques ne montrent pas une diminution de l'asymétrie comme l'a montré (Edgar et al., 2006). Dans cette étude, les auteurs montrent une réduction du pattern d'asymétrie de la M100 chez les dyslexiques. L'asymétrie fonctionnelle du cortex auditif est étudiée chez des patients schizophrènes et des dyslexiques. La localisation de la réponse auditive M100 est utilisée pour rendre compte de l'asymétrie fonctionnelle du gyrus temporal supérieur (STG). La différence de position de la M100 entre l'hémisphère droit et l'hémisphère gauche est moins importante que chez les contrôles. Pour expliquer cette asymétrie anormale, Heim, Kissler, Elbert et Rockstroh (2004) proposent qu'une source atypique soit activée dans l'hémisphère droit mais Edgar et al. (2006) n'observent pas de différences dans l'hémisphère droit. Ils suggèrent que cette asymétrie aurait davantage une origine neurodéveloppementale. Un *planum temporale* atypique et une asymétrie du gyrus temporele supérieur ont été observés chez les dyslexiques (pour une revue, voir Shapleske, Rossell, Woodruff, & David, 1999). Nos dyslexiques présentent une asymétrie différente comme dans l'étude de Veillet, Magnan et Ecalle (2004). Ils observent une différence de latéralisation du système efférent entre le groupe témoins et le groupe dyslexiques. Alors que le groupe témoins présente des voies auditives descendantes plus inhibitrices dans l'oreille droite, la latéralisation fonctionnelle auditive est inversée chez les dyslexiques. Le quotient de latéralité des dyslexiques est positif ce qui indique une prévalence de l'oreille gauche. Notre étude montre le même résultat pour notre sous-groupe DLOG. Cette latéralisation est probablement le reflet d'une asymétrie centrale différente (Khalifa & Collet, 1996 ; Khalifa, Micheyl, Veillet, & Collet, 1998 ; Veillet et al., 2001).

L'amplitude des OEAP et le fonctionnement du SEOCM

Nous avons montré une corrélation entre l'effet inhibiteur du SEOCM et l'amplitude des OEAPs pour l'oreille droite chez les normo-lecteurs. Les amplitudes des OEAPs sont d'autant plus grandes que le système efférent est inhibiteur c'est-à-dire fonctionnel. Les dyslexiques ne montrent pas de corrélations. Contrairement à l'étude de Khalfa, Micheyl et al. (1998), nous montrons une dépendance entre ces deux mesures chez le normo-lecteur. Les auteurs suggèrent que l'effet de suppression n'est pas corrélé à l'amplitude des OEAPs ni en présence ni en absence de stimulation contralatérale. Nos résultats chez les témoins remettent en cause cette indépendance des fonctions auditives. Il semblerait que dans l'oreille droite, les mécanismes actifs cochléaires soient liés au fonctionnement du système efférent qui innerve les CCE. Le SEOCM joue un rôle de régulateur de l'électromotilité des CCE, par conséquent l'amplitude des OEAPs devrait dépendre de la force de ce contrôle par le système efférent. Cependant, cette dépendance n'apparaît pas chez nos dyslexiques, nous suggérons que cela pourrait rendre compte d'un dysfonctionnement auditif des mécanismes inhibiteurs du SEOCM de l'oreille droite. Khalfa, Bruneau et al. (2001) montraient également cette indépendance entre l'amplitude des OEAPs et de la suppression contralatérale chez des témoins et des patients autistes.

Ces premiers résultats sur l'évaluation du fonctionnement des voies auditives descendantes sont primordiaux puisqu'ils nous ont permis de distinguer deux sous-groupes de dyslexiques qui présentent des différences de fonctionnement du système efférent. Nous allons maintenant étudier ces sous-groupes en analysant leurs données psychométriques et leurs performances dans la tâche d'identification auditive des pseudo-mots (Expériences 1 et 2).

5.3.4. Tests Psychométriques

Tous les participants (témoins et dyslexiques) ont effectué une série de tests psychométriques. La batterie de tests était la même que celle présentée dans le Chapitre 4, à savoir un test de dépistage rapide de la dyslexie (l'ODÉDYS), un test de lecture (l'Alouette) et un test d'intelligence non verbal (les Matrices Progressives standard de Raven). Les tests se passaient au laboratoire Dynamique Du Langage, de manière individuelle, dans une salle d'expérimentation calme. L'ensemble des tests durait environ une heure.

5.3.4.1. Résultats

Nous avons analysé les résultats concernant les performances en lecture tout d'abord ; puis nous nous sommes intéressés aux autres épreuves cognitives. Un test t pour des échantillons indépendants a été utilisé pour comparer les performances des deux groupes aux différentes épreuves.

Tableau 30 : Moyennes des tests psychométriques et du test d'audiométrie tonale pour les groupes témoins et dyslexiques et résultats des tests t pour des échantillons indépendants (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$). L'écart-type est entre parenthèses (σ).

	Témoins N = 20 Moyenne (σ)	Dyslexiques N = 20 Moyenne (σ)	Valeur de p
<i>Âge</i>	24.4 (5.6)	24.3 (5.8)	ns
<i>Matrices progressives standards de Raven</i>			
Score (/60)	53.8 (2.7)	48.5 (7.3)	ns
<i>Test de l'Alouette (Lefavrais, 1967)</i>			
Âge lexique	plus de 14 ; 3	11 ; 5	***
Temps total pour lire 256 mots (s)	93.7 (10.6)	128.9 (27.3)	***
Nombre d'erreurs total sur 256 mots lus	3 (1.9)	12.9 (9.5)	***
<i>Lecture</i>			
Temps total pour lire 20 mots réguliers (s)	13.3 (4)	20.7 (10.4)	**
Score sur 20 mots réguliers lus	20 (0)	18.7 (2.2)	**
Temps total pour lire 20 mots irréguliers (s)	14.1 (4.3)	20.3 (9.1)	**
Score sur 20 mots irréguliers lus	19.9 (0.4)	17.9 (2.8)	**
Temps total pour lire 20 pseudo-mots (s)	18.8 (3.8)	30 (9.5)	***
Score sur 20 pseudo-mots lus	19.1 (1.5)	15.6 (3.4)	***

(suite du Tableau 30)

<i>Dictée</i>			
Score dictée 10 mots réguliers	9.9 (0.3)	9.7 (0.8)	ns
Score dictée 10 mots irréguliers	9.7 (0.8)	8.5 (1.5)	**
Score dictée 10 pseudo-mots	9.8 (0.6)	9.3 (1.6)	ns
<i>Conscience Phonémique</i>			
Suppression de phonèmes initiaux (/10)	9.5 (1.8)	8.4 (2.1)	ns
Fusion de phonèmes – Acronymes (/10)	9.1 (1.9)	7 (3)	**
<i>Mémoire de travail</i>			
Empan endroit	6.4 (0.8)	6.3 (1.4)	ns
Empan envers	5.4 (1.2)	4.7 (1.2)	ns
<i>Tâches visuelles</i>			
Score séquence de lettres (/20)	19.5 (1.2)	18.9 (1.2)	ns
Temps séquence de lettres (s)	32.8 (6.5)	49.5 (22.2)	**
Score test des cloches (/35)	34.5 (0.8)	33.9 (0.9)	*
Temps test des cloches (s)	115.5 (9.1)	112.6 (11.9)	ns
<i>Audiométrie tonale</i>			
Seuil auditif moyen de l'oreille droite pour 0.25, 0.5, 1, 2, 4 et 8 kHz (dB HL)	4.2 (5.7)	3.0 (6.4)	ns
Seuil auditif moyen de l'oreille gauche pour 0.25, 0.5, 1, 2, 4 et 8 kHz (dB HL)	4.2 (5.6)	2.6 (5.3)	ns

La Lecture

l'Alouette

Une différence significative entre les deux groupes est observée pour le nombre d'erreurs, pour le temps de lecture et pour l'âge lexique ($t_{38} = -4.57$, $p < .001$; $t_{38} = -5.38$, $p < .001$ et $t_{38} = 5.76$, $p < .001$). Le groupe témoins a un âge lexique de plus de 14 ans et 3 mois alors que les dyslexiques ont un âge lexique moyen de 11 ans et 5 mois. Les dyslexiques font plus d'erreurs (12.9 erreurs vs. 3 erreurs) et lisent moins vite que les normo-lecteurs (128.9 s vs. 93.7 s) (Tableau 30, Figure 69 et Figure 70). Un test de corrélation de Pearson a mis en évidence une corrélation positive du nombre de fautes et du temps de lecture pour les dyslexiques mais pas pour les témoins ($r = 0.70$, $p < .001$; $r = -0.04$, $p = 0.87$) (Figure 71). Les deux variables dépendantes augmentent en parallèle : le nombre de fautes augmente avec le temps de lecture.

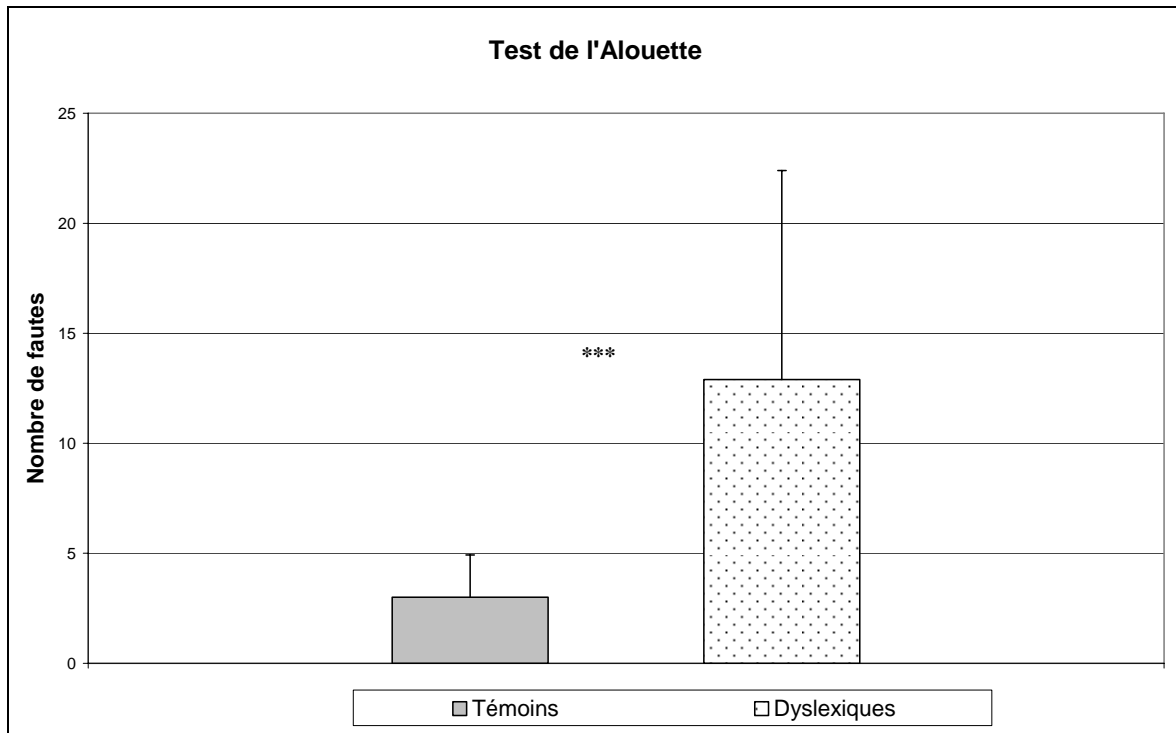


Figure 69 : Nombres de fautes commises par les témoins et les dyslexiques lors de la lecture du texte de l'Alouette (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$).

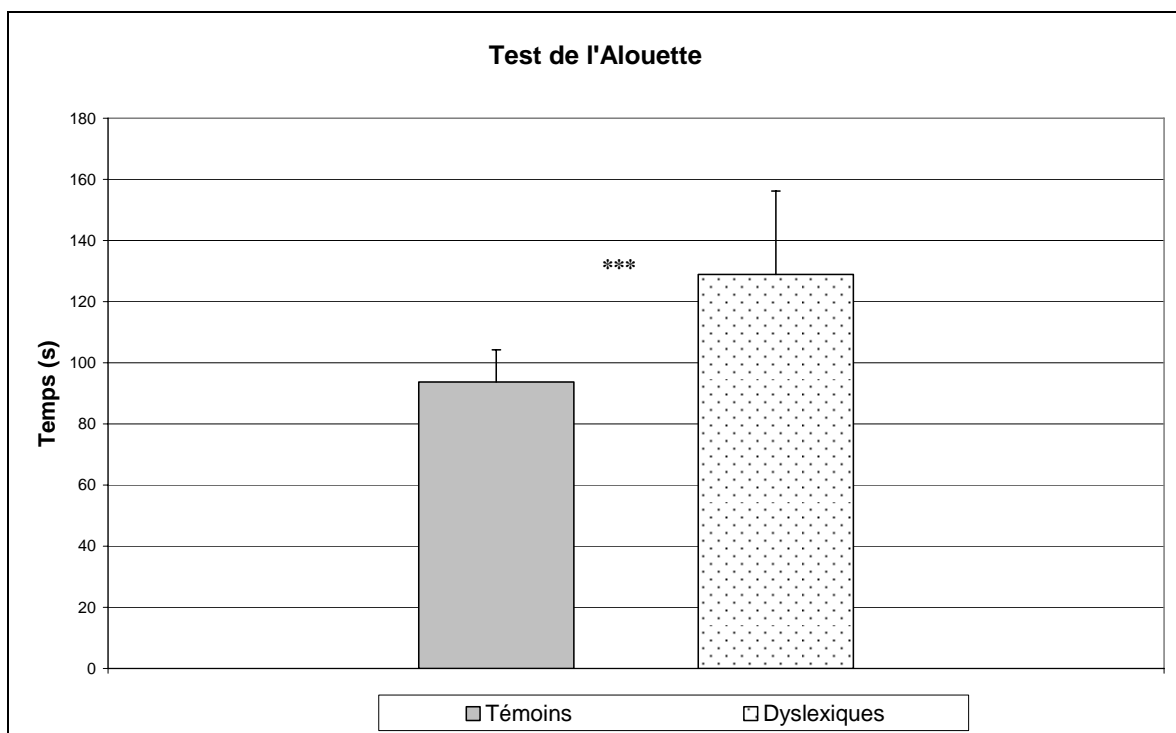


Figure 70 : Vitesse de lecture du texte de l'Alouette par les témoins et les dyslexiques (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$).

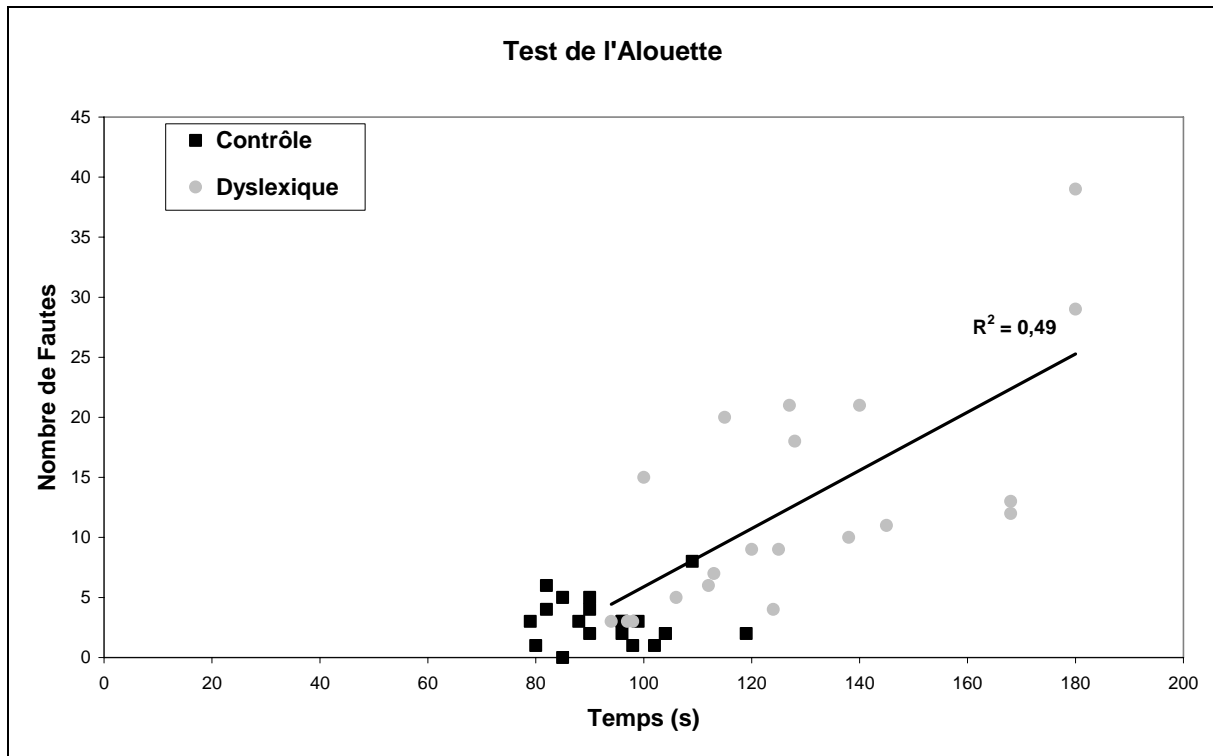


Figure 71 : Corrélation entre le temps de lecture et le nombre de fautes lors de la lecture du texte de l'Alouette pour les groupe contrôle et dyslexique (Courbe de tendance linéaire).

Lecture de l'ODÉDYS

Les épreuves de lecture dans le test de l'ODÉDYS montrent toutes une différence significative entre les deux groupes (Témoins et Dyslexiques), aussi bien au niveau du score qu'au niveau du temps de lecture, pour les mots irréguliers, les mots réguliers et les pseudo-mots (mots irréguliers Score : $t_{38} = 3.14$, $p < .01$ / Temps de lecture : $t_{38} = -2.75$, $p < .01$; mots réguliers Score : $t_{38} = 2.80$, $p < .01$ / Temps de lecture : $t_{38} = -2.98$, $p < .01$; pseudo-mots Score : $t_{38} = 4.23$, $p < .001$ / Temps de lecture : $t_{38} = -4.88$, $p < .001$). Les dyslexiques ont des scores plus bas que les témoins pour les mots irréguliers (17.9 vs. 19.9), les mots réguliers (18.7 vs. 20) et les pseudo-mots (15.6 vs. 19.1). Ils sont également plus lents en lecture de mots irréguliers (20.3 vs. 14.1 s), de mots réguliers (20.7 vs. 13.3 s) et de pseudo-mots (30 vs. 18.8 s) (Tableau 30). Nous pouvons remarquer que les différences sont plus importantes pour les scores et les temps de lecture des pseudo-mots (Figure 72 et Figure 73).

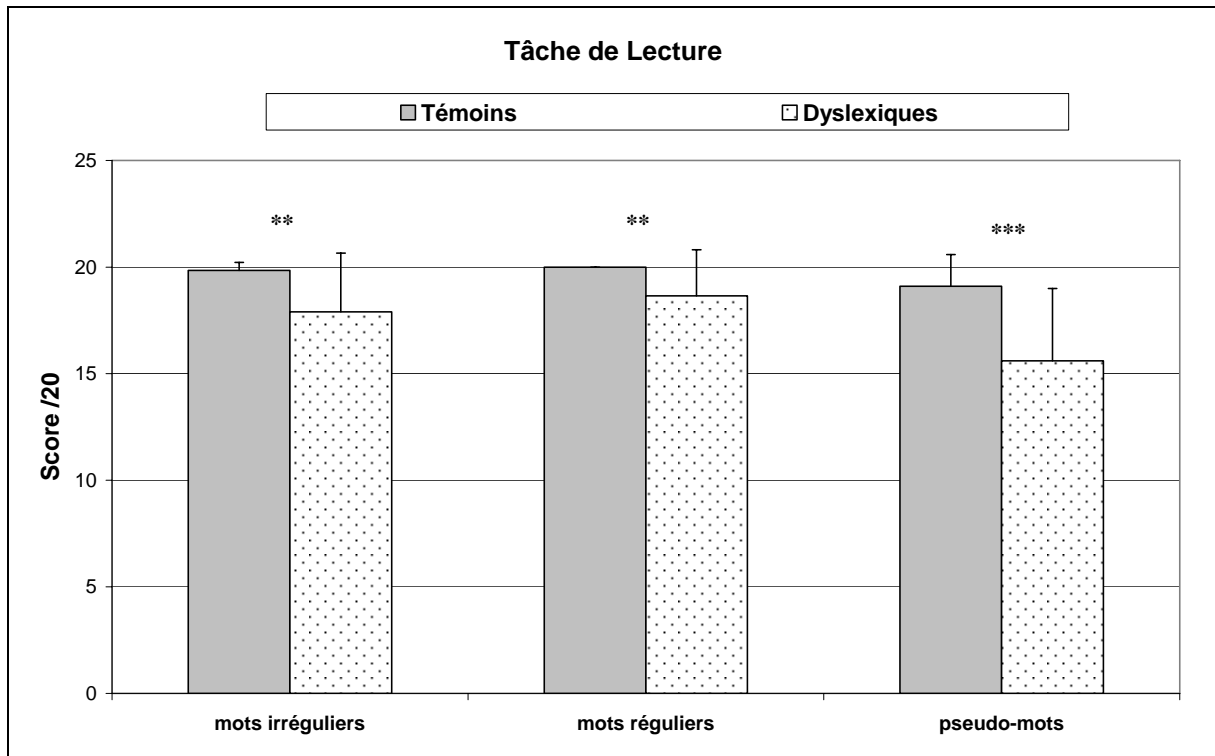


Figure 72 : Performances en lecture de mots irréguliers, réguliers et de pseudo-mots chez les témoins et les dyslexiques, le score est sur 20 (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$).

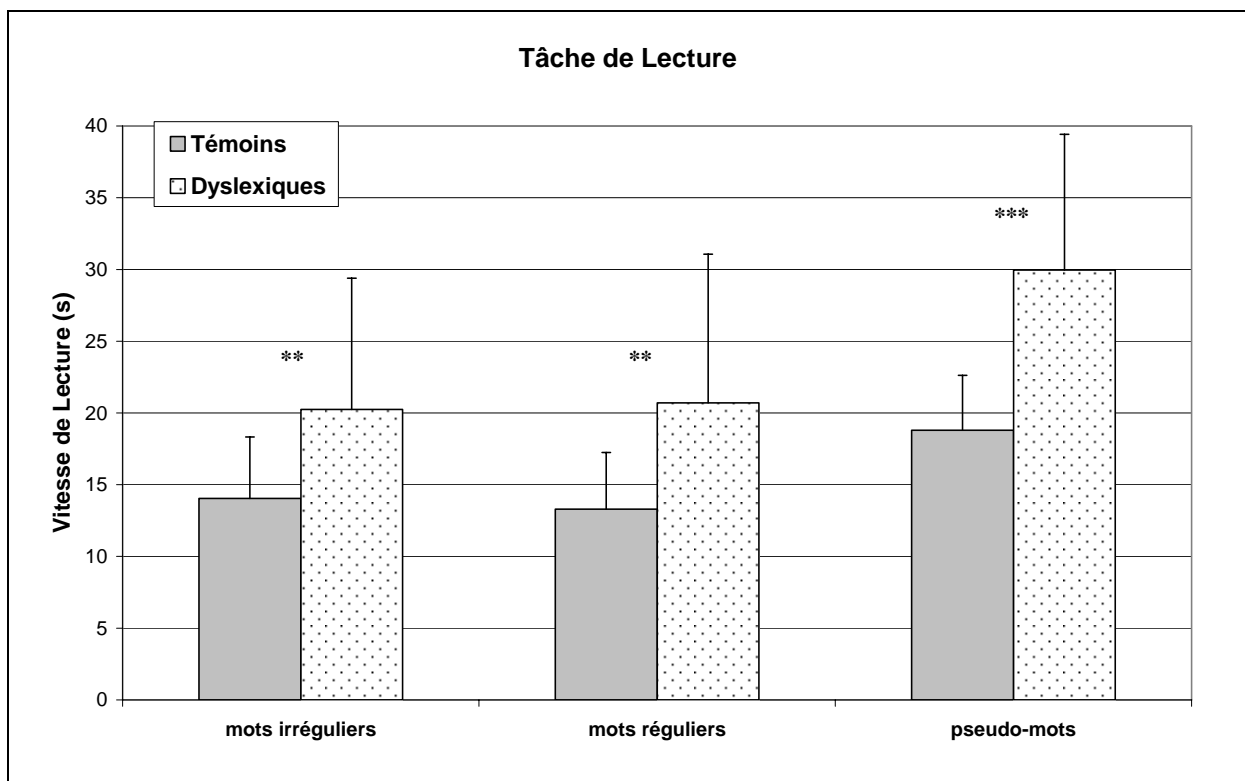


Figure 73 : Performances en vitesse de lecture de mots irréguliers, réguliers et de pseudo-mots chez les témoins et les dyslexiques, le temps est exprimé en secondes (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$).

La dictée

Les dyslexiques ont un score significativement plus faible que les témoins en dictée de mots irréguliers ($t_{38} = 3.06$, $p < .01$) mais pas en dictée de mots réguliers ou de pseudo-mots ($t_{38} = 1.39$, $p = 0.17$; $t_{38} = 1.33$, $p = 0.19$). Le score des dyslexiques en dictée de mots irréguliers est de 8.5/10 alors que celui des témoins est 9.7/10 (Figure 74). Le score des dyslexiques est équivalent à celui des témoins pour les mots réguliers (9.7 vs. 9.9) et les pseudo-mots (9.3 vs. 9.8) (Tableau 30).

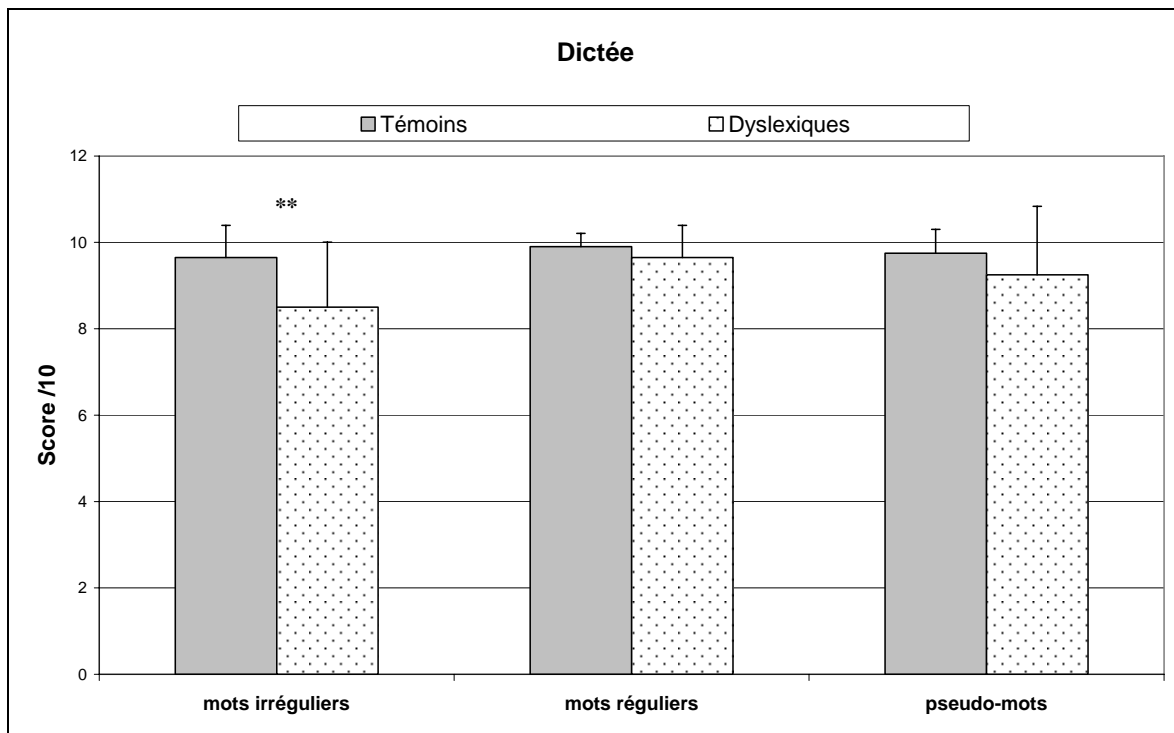


Figure 74 : Performances en dictée des deux groupes pour des mots irréguliers, réguliers et des pseudo-mots (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$).

Conscience phonémique

Dans la tâche de suppression de phonèmes initiaux nous n'observons pas de différence significative entre les deux groupes (NL : 9.5/10 et DL : 8.4/10 ; $t_{38} = 1.79$, $p = 0.08$). Nous pouvons remarquer une tendance à la baisse du score moyen chez les dyslexiques. Une différence significative apparaît, entre les deux groupes, dans la tâche de fusion de phonèmes ($t_{38} = 2.65$, $p < .05$). Les DL ont plus de difficultés à effectuer cette tâche que les NL (7/10 vs. 9.1/10) (Tableau 30).

Mémoire de travail

Pour les épreuves de mémoire de travail, nous n'observons aucune différence entre les deux groupes, ni pour l'empan endroit ($t_{38} = 0.28$, $p = 0.78$), ni pour l'empan envers ($t_{38} = 1.84$, $p = 0.07$). Les capacités mnésiques des dyslexiques sont identiques à celles des témoins (Tableau 30).

Tâches visuelles

Dans le test des cloches, une différence significative entre les deux groupes est observée sur le score ($t_{38} = 2.23$, $p < .05$) mais pas sur le temps mis pour effectuer la tâche ($t_{38} = 0.86$, $p = 0.39$). Les dyslexiques sont moins performants dans cette épreuve que les témoins (33.9/35 vs. 34.5/35) et ceci dans un temps équivalent à celui des témoins (112.6 s vs. 115.5 s). À l'inverse, dans l'épreuve de jugement d'identité de deux séquences de lettres, nous observons une différence significative pour le temps de décision mais pas pour le score de réponses justes ($t_{38} = -3.23$, $p < .01$; $t_{38} = 1.45$, $p = 0.16$). Les dyslexiques sont plus lents que les témoins (49.5 s vs. 32.8 s) mais ils ont d'aussi bons scores que les témoins (18.9/20 vs. 19.5/20) (Tableau 30).

Comparaison des témoins avec les deux sous-groupes de dyslexiques

D'après les sous-groupes constitués sur la base du fonctionnement du système efférent, nous étudions leurs performances aux tests psychométriques. Nous cherchons à identifier des liens possibles entre les tests psychométriques et le fonctionnement du système efférent chez les trois groupes.

Globalement, les résultats aux tests psychométriques sont plus mauvais pour le groupe DLOD que pour le groupe DLOG par rapport au groupe témoins. Le Tableau 31 présente les moyennes pour chaque groupe aux tests psychométriques.

l'Alouette

Une différence significative entre les témoins (NL) et les deux sous-groupes de dyslexiques (DLOD et DLOG) est observée pour le nombre d'erreurs, pour le temps de lecture et pour l'âge de lecture (NL vs. DLOD : $t_{28} = -4.98$, $p < .001$; $t_{28} = -5.69$, $p < .001$; $t_{28} = 5.95$, $p < .001$ et NL vs. DLOG : $t_{28} = -4.23$, $p < .001$; $t_{28} = -5.19$, $p < .001$; $t_{28} = 5.64$, $p < .001$). Le groupe témoins a un âge lexique de plus de 14 ans et 3 mois alors que le groupe DLOD a un âge lexique moyen de 10 ans et 11 mois et le groupe DLOG de 11 ans et 11 mois.

Les dyslexiques font plus d'erreurs (DLOD = 15.4 erreurs et DLOG = 10.4 erreurs) que les témoins (3 erreurs) et lisent moins vite (DLOD = 139.3 s et DLOG = 118.5 s) (Tableau 31, Figure 75 et Figure 76).

Tableau 31 : Moyennes des tests psychométriques pour les groupes témoins, DLOG et DLOD. Résultats des tests t pour des échantillons indépendants entre le groupe témoins et le groupe DLOD (* p < .05, ** p < .01, *** p < .001). L'écart-type est entre parenthèses (σ).

		Témoins N = 20	DLOG N = 10	DLOD N = 10	t_{28}	p
<i>Test de l'Alouette (Lefavrais, 1967)</i>						
Âge lexique		plus de 14 ; 3	11 ; 11	10 ; 11		
Temps (s)		93.7 (10.6)	118.5 (15.4)	139.3 (33.1)		
Fautes		3 (1.9)	10.4 (7.5)	15.4 (11)		
<i>Lecture</i>						
Mots réguliers	Temps (s)	13.3 (4)	16.2 (5.3)	25.2 (12.4)	-3.96	***
	Score /20	20 (0)	19 (1.4)	18.3 (2.8)	2.81	**
Mots irréguliers	Temps (s)	14.1 (4.3)	18.1 (7.8)	22.4 (10.2)	-3.18	**
	Score /20	19.9 (0.4)	18 (1.8)	17.8 (3.6)	2.60	*
Pseudo-mots	Temps (s)	18.8 (3.8)	27.8 (6.6)	32.1 (11.6)	-4.69	***
	Score /20	19.1 (1.5)	16.1 (3)	15.1 (3.8)	4.13	***
<i>Dictée</i>						
Mots réguliers	Score /10	9.9 (0.3)	9.7 (0.5)	9.6 (1)	1.28	ns
Mots irréguliers	Score /10	9.7 (0.8)	9.2 (1.3)	7.8 (1.4)	4.76	***
Pseudo-mots	Score /10	9.8 (0.6)	9.8 (0.4)	8.7 (2.1)	2.12	*
<i>Conscience Phonémique</i>						
Suppression de phonèmes initiaux (/10)		9.5 (1.8)	8.1 (2.4)	8.7 (1.8)	1.16	**
Fusion de phonèmes – Acronymes (/10)		9.1 (1.9)	7.3 (3.1)	6.6 (3.1)	2.72	*
<i>Mémoire de travail</i>						
Empan endroit		6.4 (0.8)	6.4 (1.3)	6.1 (1.6)	0.59	ns
Empan envers		5.4 (1.2)	5 (1.2)	4.4 (1.2)	2.13	*
<i>Tâches visuelles</i>						
Séquence de lettres	Score /20	19.5 (1.2)	19 (0.9)	18.8 (1.4)	1.3	ns
	Temps (s)	32.8 (6.5)	44.2 (8.3)	54.8 (30.1)	-3.17	**
Test des cloches	Score (/35)	34.5 (0.8)	34 (0.9)	33.7 (0.9)	2.35	*
	Temps (s)	115.5 (9.1)	111.10 (12.8)	114.10 (11.4)	0.36	ns

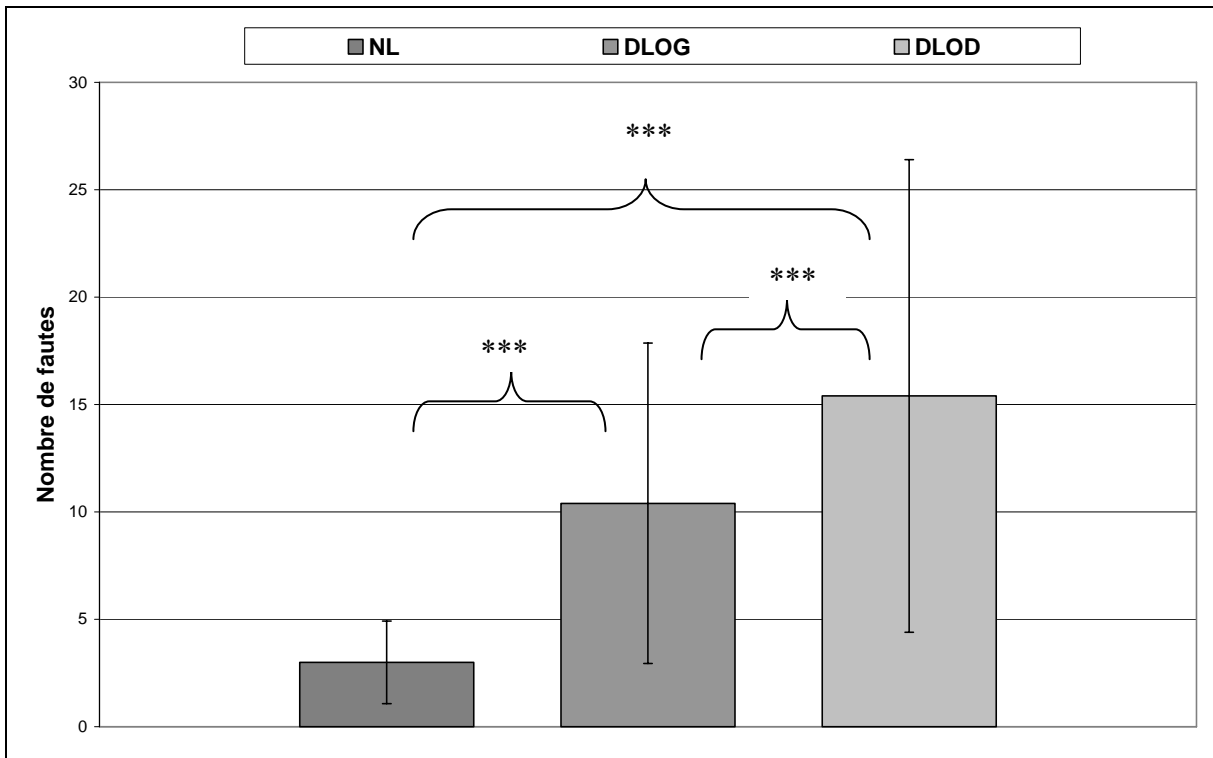


Figure 75 : Nombres de fautes au test de l'Alouette pour les 3 groupes NL, DLOG et DLOD (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$).

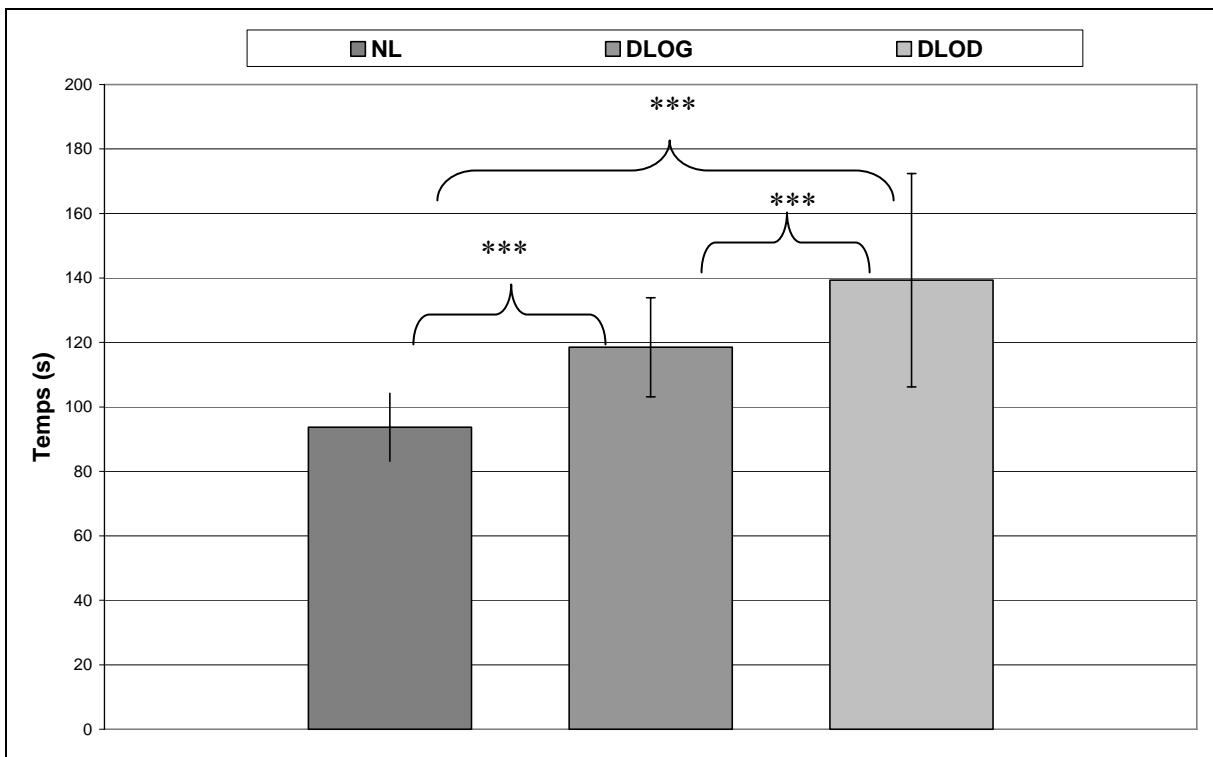


Figure 76 : Temps mis pour lire le texte de l'Alouette pour les groupes NL, DLOG et DLOD (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$).

Lecture de l'ODÉDYS

Les épreuves de lecture dans le test de l'ODÉDYS montrent toutes une différence significative entre les deux groupes (témoins et DLOD), aussi bien au niveau du score qu'au niveau du temps de lecture, pour les mots irréguliers, les mots réguliers et les pseudo-mots (mots irréguliers Score : $t_{28} = 2.60$, $p < .05$ / Temps de lecture : $t_{28} = -3.18$, $p < .01$; mots réguliers Score : $t_{28} = 2.81$, $p < .01$ / Temps de lecture : $t_{28} = -3.96$, $p < .001$; pseudo-mots Score : $t_{38} = 4.13$, $p < .001$ / Temps de lecture : $t_{38} = -4.69$, $p < .001$). Les DLOD ont des scores plus bas que les témoins pour les mots irréguliers (17.8 vs. 19.9), les mots réguliers (18.3 vs. 20) et les pseudo-mots (15.1 vs. 19.1). Ils sont également plus lents en lecture de mots irréguliers (22.4 vs. 14.1 s), de mots réguliers (25.2 vs. 13.3 s) et de pseudo-mots (32.1 vs. 18.8 s) (Tableau 31). Les DLOG ont un score significativement plus faible que les témoins, pour les mots irréguliers ($t_{28} = 4.43$, $p < .001$), pour les mots réguliers ($t_{28} = 3.22$, $p < .01$) et pour les pseudo-mots ($t_{28} = 3.70$, $p < .001$). Pour ces derniers, les DLOG sont moins rapide en temps de lecture que les témoins ($t_{28} = -4.75$, $p < .001$) (Figure 77). Les différences sont plus importantes pour les scores et les temps de lecture des pseudo-mots. Remarquons également qu'en lecture de mots réguliers, les DLOG sont plus rapides que les DLOD ($t_{28} = 2.11$, $p < .05$) (Figure 78).

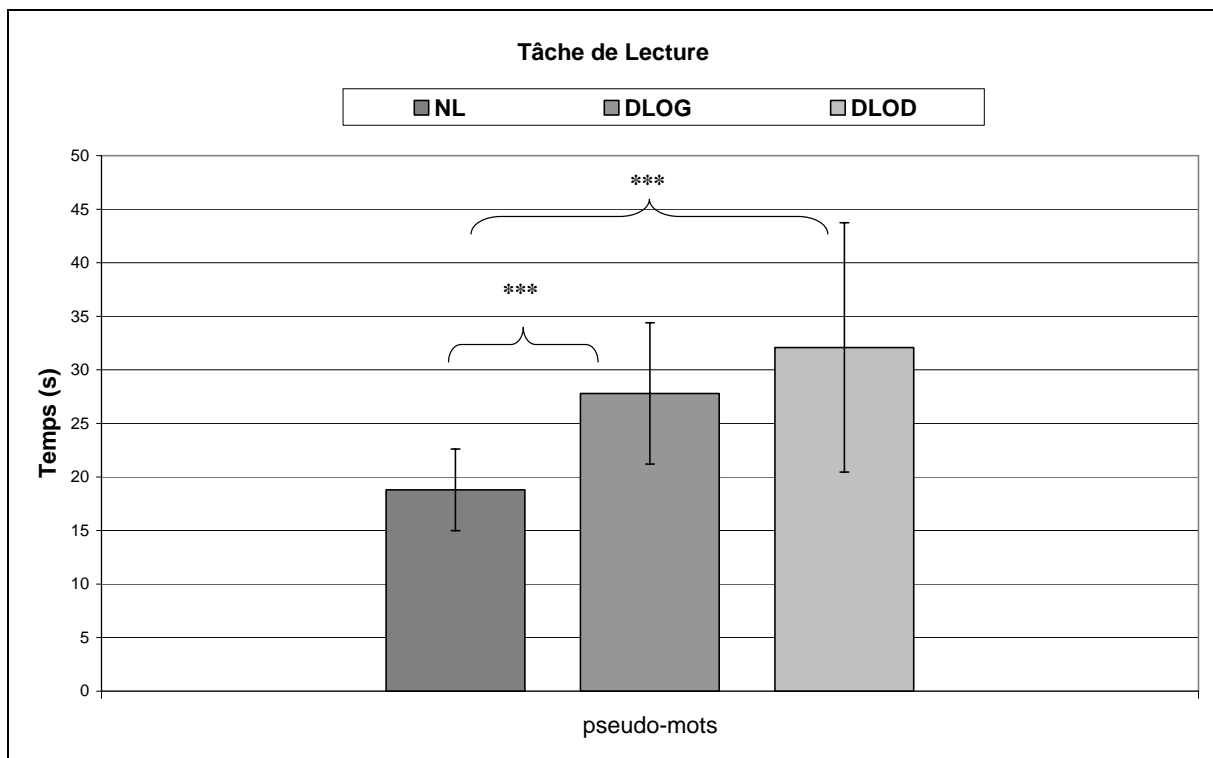


Figure 77 : Temps de lecture de pseudo-mots dans le test de l'ODÉDYS pour les 3 groupes NL, DLOG et DLOD (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$).

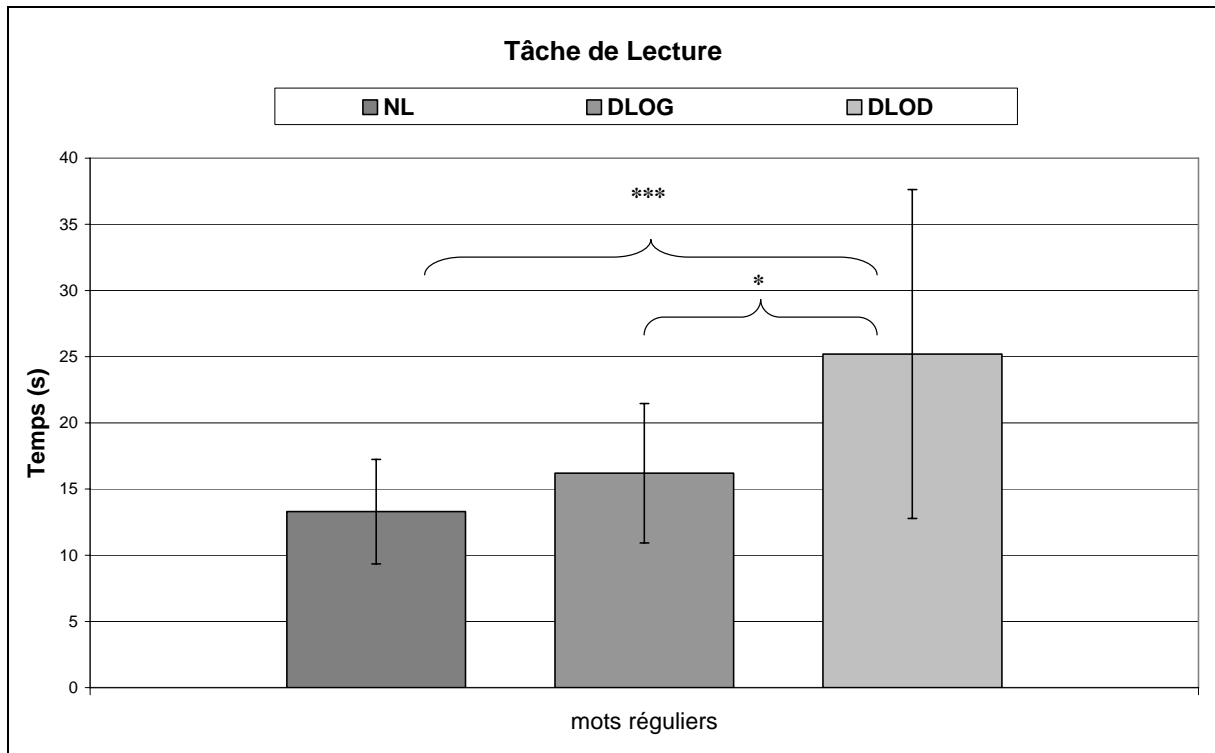


Figure 78 : Temps de lecture de mots réguliers dans le test de l'ODÉDYS pour les 3 groupes NL, DLOG et DLOD (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$).

La dictée

Les DLOD ont un score significativement plus faible que les témoins en dictée de mots irréguliers et de pseudo-mots ($t_{28} = 4.76$, $p < .001$; $t_{28} = 2.12$, $p < .05$) mais pas en dictée de mots réguliers ($t_{28} = 1.28$, ns). Le score des DLOD en dictée de mots irréguliers est de 7.8/10 alors que celui des témoins est 9.7/10 (Figure 79) et pour les pseudo-mots, les DLOD ont un score de 8.7/10 alors que les témoins ont un score de 9.8/10. Le score des dyslexiques est équivalent à celui des témoins pour les mots réguliers (9.6 vs. 9.9) (Tableau 31). Les DLOG ont un score plus élevé que les DLOD en dictée de mots irréguliers ($t_{28} = -2.31$, $p < .05$) (Figure 79).

Conscience phonémique

Dans les deux tâches de conscience phonologique, nous observons une différence significative entre les témoins et les DLOD (Suppression de phonèmes initiaux : $t_{28} = 1.16$, $p < .01$ et Fusion de phonèmes : $t_{28} = 2.72$, $p < .05$). Les DLOD ont plus de difficultés à effectuer ces tâches que les témoins (Suppression de phonèmes initiaux : 8.7/10 vs. 9.5/10 et Fusion de phonèmes : 6.6/10 vs. 9.1/10) (Tableau 31).

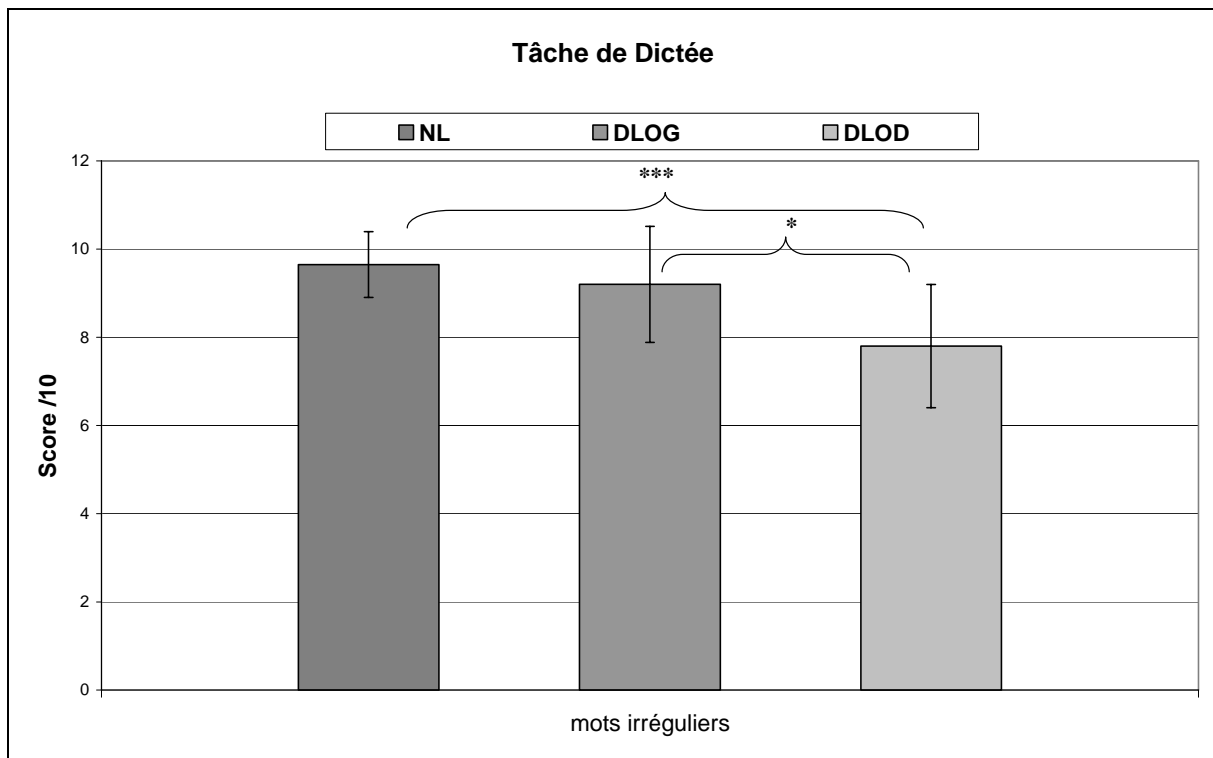


Figure 79 : Scores des 3 groupes NL, DLOG et DLOD en dictée de mots irréguliers (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$).

Mémoire de travail

Pour les épreuves de mémoire de travail, nous observons une différence significative entre les témoins et DLOD pour l'empan envers ($t_{28} = 2.13$, $p < .05$) mais pas pour l'empan endroit ($t_{28} = 0.59$, ns). Les capacités mnésiques des DLOG sont identiques à celles des témoins (Tableau 31).

Tâches visuelles

Dans le test des cloches, une différence significative entre les témoins et les DLOD est observée sur le score ($t_{28} = 2.35$, $p < .05$) mais pas sur le temps mis pour effectuer la tâche ($t_{28} = 0.36$, ns). Les DLOD sont moins performants dans cette épreuve que les témoins (33.7/35 vs. 34.5/35) et ceci dans un temps équivalent à celui des témoins (114.1 s vs. 115.5 s). À l'inverse, dans l'épreuve de jugement d'identité de deux séquences de lettres, nous observons une différence significative pour le temps de décision mais pas pour le score de réponses justes ($t_{28} = -3.17$, $p < .01$; $t_{28} = 1.3$, ns). Les DLOD sont plus lents que les témoins (54.8 s vs. 32.8 s) mais ils ont d'aussi bons scores que les témoins (18.8/20 vs. 19.5/20)

(Tableau 31). Dans cette deuxième tâche, le groupe DLOG est significativement plus lent que le groupe témoins ($t_{28} = -4.12, p < .001$).

5.3.4.2. Corrélation du fonctionnement du SEOCM avec les mesures psychométriques

Le test de Pearson met en évidence une corrélation positive chez les témoins alors qu'une corrélation négative est observée chez le groupe DLOG entre le temps de lecture de mots irréguliers et la valeur de l'atténuation équivalente de l'oreille gauche (NL : $r = 0.45, p < .05$; DLOG : $r = -0.68, p < .05$). Chez le groupe DLOD, cette corrélation n'est pas significative ($r = -0.30, p = 0.40$) (Figure 80).

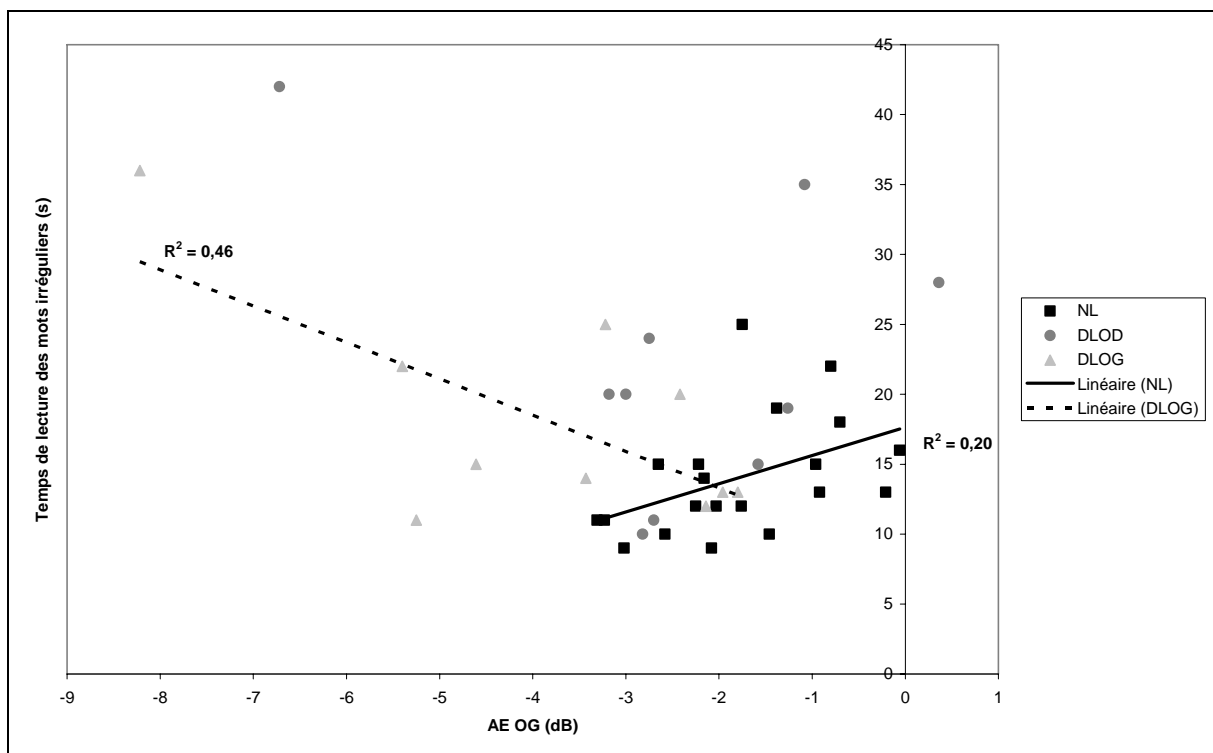


Figure 80 : Corrélations entre les temps de lecture des mots irréguliers et l'atténuation équivalente de l'oreille gauche pour les groupes NL et DLOG (Courbes de tendance linéaire).

5.3.4.3. Discussion

Suite à l'analyse des résultats psychométriques de nos trois groupes, nous avons pu nous apercevoir que le groupe DLOD était le groupe présentant le plus de difficultés aussi bien en lecture, en dictée, en conscience phonémique, en mémoire de travail et en épreuves visuelles. En effet, le groupe DLOG présente moins de difficultés que le groupe DLOD excepté en lecture. Nous allons maintenant discuter de ces différences entre les groupes.

Alouette

Tous les dyslexiques présentent un âge lexique inférieur aux normo-lecteurs, ils font plus de fautes et ont une lecture plus laborieuse et plus lente. Une corrélation entre le nombre de fautes et le temps de lecture a été montré chez les dyslexiques mais pas chez les témoins, ce qui indique que le nombre de fautes augmente avec le temps de lecture. Les deux sous-groupes de dyslexiques présentent donc des difficultés en lecture, encore à l'âge adulte.

Lecture Odédys

Les DLOD présentent des scores plus faibles et des temps de lecture plus longs aussi bien pour les mots irréguliers, les mots réguliers et les pseudo-mots que les normo-lecteurs. Globalement, nous remarquons que les DLOG sont plus rapides que les DLOD. Cependant, nous remarquons que la différence entre les groupes est plus marquée pour la lecture des pseudo-mots, ce qui rend compte d'un trouble de la voie phonologique, qui met en jeu un décodage du mot inconnu grâce aux règles de conversion des graphèmes en phonèmes.

Dictée

Seuls les DLOD présentent des scores plus faibles en dictée de mots irréguliers et de pseudo-mots qui font appel à la voie lexicale et à la voie phonologique. Les règles d'irrégularités orthographiques de la langue correspondent à une réelle difficulté chez les dyslexiques lors de l'apprentissage de l'écriture d'où l'association fréquente de la dysorthographe qui persiste chez les adultes de manière assez importante. Alors que les troubles phonologiques ont été largement démontrés. Une différence apparaît entre les deux sous-groupes de dyslexiques pour le score des mots irréguliers qui pourrait rendre compte de leur type de dyslexie.

Consciencés phonémique

Seuls les DLOD montrent des difficultés à effectuer ces tâches métaphonologiques. Dans ces tâches, les participants doivent manipuler les segments sonores et doivent donc avoir conscience de cette segmentation en unité plus petite que la syllabe. Il apparaît que les DLOD ont des difficultés dans la manipulation des unités sonores. Ces résultats rendent compte de troubles phonologiques chez les dyslexiques.

Mémoire de travail

Seuls les DLOD ont des difficultés dans la tâche d'empan envers. L'empan envers met en jeu la mémoire auditivo-verbale. Cette mémoire auditivo-verbale est utilisée dans notre tâche d'identification auditive de pseudo-mots. Le participant dyslexique doit répéter le pseudo-mot entendu donc le maintien en mémoire est obligatoire ainsi que l'utilisation de la boucle phonologique (Baddeley, 1986). Les DLOD auraient un dysfonctionnement de cette boucle phonologique.

Épreuves visuelles

Tous les dyslexiques sont plus lents que les NL dans l'épreuve visuelle verbale (jugement d'identité de séquences de lettres) et non dans la tâche visuelle utilisant des dessins (test des cloches). Rappelons que dans le test des cloches, le temps maximum imparti est de 2 min. Les dyslexiques ont donc respecté ce temps mais au prix d'oublis plus importants, pour les DLOD, par rapport aux témoins. Ces résultats suggèrent que les dyslexiques utilisent deux stratégies différentes dans ces deux épreuves : soit ils sont rapides et font des erreurs, soit ils prennent leur temps et ne font pas d'erreurs. Il apparaît qu'il leur est difficile de répondre à la fois rapidement et correctement. Nous pouvons suggérer que dans la tâche verbale, où les temps de décision sont plus longs pour les dyslexiques, c'est le traitement visuel des lettres qui est perturbé. Alors que dans la tâche où le dyslexique doit repérer des cloches parmi d'autres dessins, c'est un trouble visuo-spatio-attentionnel qui rendrait compte des oublis des dyslexiques.

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 4, le diagnostic chez l'adulte dyslexique est difficile, du fait notamment de l'inexistence de tests adaptés. Une exception existe en anglais, le *Nelson-Denny Reading Test* (Brown, Fishco, & Hanna, 1993) qui met l'accent sur l'évaluation du temps mis par les adultes dyslexiques pour effectuer les tâches, plus que sur les scores. En effet, les stratégies de compensation mises en place tout au long de la vie du dyslexique permettent à celui-ci d'améliorer ces performances mais la seule chose qui persiste est sa lenteur. Nos résultats mettent en évidence ces différences de vitesse entre les sous-groupes de dyslexiques et les témoins, plus marquées pour les DLOD. Rappelons que les DLOD présentent un système efférent latéralisé à droite, comme les témoins, mais ils présentent une sorte d'hyperactivité du fonctionnement inhibiteur du SEOCM. Nous nous

posons la question d'une éventuelle corrélation entre le fonctionnement du système efférent et les capacités langagières des DLOD.

Corrélations

Aucunes corrélations n'ont été trouvées chez les DLOD entre les mesures audiométriques et les mesures psychométriques. Par contre, nous avons observé des corrélations différentes entre l'atténuation équivalente de l'oreille gauche et le temps de lecture des mots irréguliers chez les témoins et chez les DLOG. La corrélation négative des DLOG est la plus forte et la plus pertinente. Les temps de lecture des mots irréguliers augmentent avec l'augmentation de l'atténuation équivalente de l'oreille gauche. Nous avons décrit les DLOG comme ayant un système efférent latéralisé à gauche donc plus fonctionnel à gauche. La différence d'asymétrie cérébrale est corrélée à une lecture lente des mots irréguliers. Les mots irréguliers sont traités par la voie lexicale qui active la voie pour le traitement orthographique au niveau cérébral. L'imagerie cérébrale montre une implication du gyrus supramarginal droit dans le traitement sémantique, donc dans le langage (Binder et al., 1997). Le système efférent gauche provient des aires auditives de l'hémisphère droit donc nous pouvons supposer qu'il existe un dysfonctionnement global de l'hémisphère droit qui rend compte à la fois d'un mauvais traitement orthographique et d'un mauvais rétrocontrôle cochléaire via le système efférent.

5.3.5. Expérience 1 : Compression temporelle du trait de voisement

5.3.5.1. Comparaison des trois groupes

Le test t pour des échantillons indépendants a permis de montrer des différences significatives entre les groupes. Le groupe NL a des performances d'identification supérieures que DLOD et DLOG pour C1, C2 et CVCV (Tableau 32 et Figure 81).

Tableau 32 : Taux d'identification correcte (%) de C1, C2 et CVCV, dans l'Expérience 1, pour les 3 groupes NL, DLOD et DLOG. Résultats de tests t, comparaison entre NL et DLOD et NL et DLOG (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$). L'écart-type est entre parenthèses (σ).

	NL	DLOD	DLOG	t_{28}	p
C1	87.3 (4)	78 (7.1)	81.6 (5.1)	4.62 / 3.36	*** / **
C2	91.7 (3.5)	85.2 (5.5)	85.3 (7.4)	3.97 / 3.25	*** / **
CVCV	80.5 (5.4)	68.8 (8.9)	70.2 (8.4)	4.55 / 4.13	*** / ***

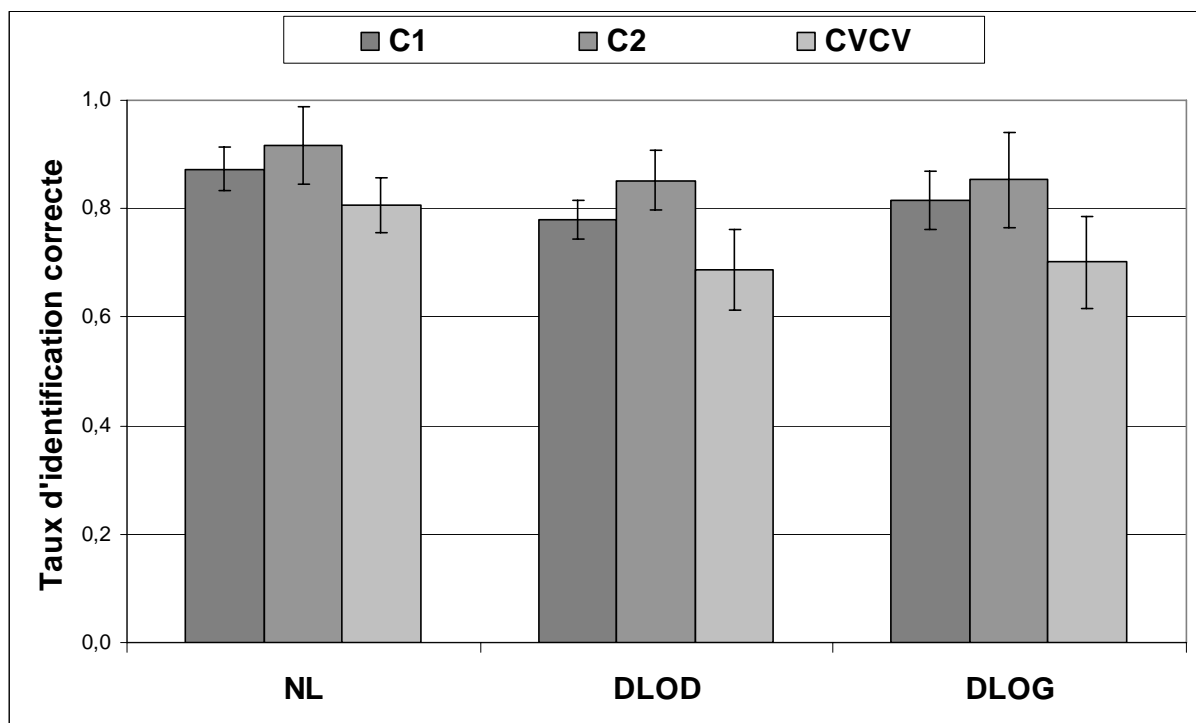


Figure 81 : Performances d'identification de la consonne d'attaque (C1), de la consonne intervocalique (C2) et du pseudo-mot (CVCV) pour les trois groupes NL, DLOD et DLOG.

5.3.5.2. Corrélation du fonctionnement du SEOCM et des performances d'identification auditive des consonnes

Un test de Pearson entre les variables audiométriques et les variables comportementales pour chacun des groupes montre une corrélation négative significative. L'amplitude des OEAP de l'oreille gauche corrèle avec le taux d'identification de la consonne d'attaque pour le groupe DLOD ($r = -0.63$; $p < .05$). Les performances d'identification de la consonne d'attaque diminuent avec l'augmentation de l'amplitude des OEAP dans l'oreille gauche.

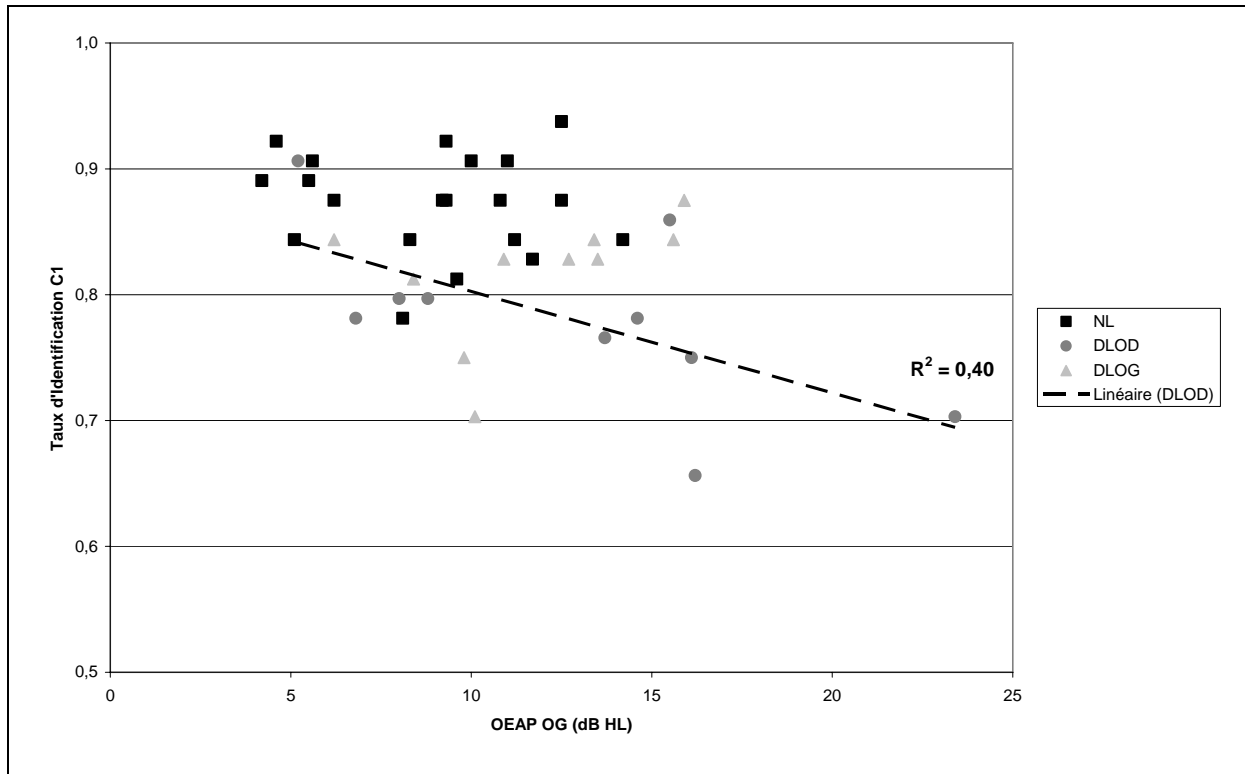


Figure 82 : Corrélation entre l'amplitude des OEAP de l'oreille gauche et le taux d'identification de la consonne d'attaque chez le groupe DLOD (Courbe de tendance linéaire).

5.3.5.3. Discussion

Dans cette Expérience 1, nous réduisons la durée du trait de voisement. Les dyslexiques sont sensibles à la réduction de la durée du trait de voisement, plus particulièrement les DLOD. Chez les DLOD, cette sensibilité est corrélée à leurs mesures du SEOCM. Les performances d'identification de la consonne d'attaque diminuent avec l'augmentation de l'amplitude des OEAP de l'oreille gauche. Nous avons remarqué une forte amplitude des OEAP de l'oreille gauche qui correspond à une réponse importante des CCE de l'oreille gauche. Cette hyperactivité cochléaire pourrait être néfaste à la perception du trait de voisement. Un dysfonctionnement du système efférent gauche et une prévalence de l'oreille

droite pour le fonctionnement du système efférent chez les DLOD expliqueraient leur sensibilité au voisement. Les voies auditives descendantes sont croisées, l'hémisphère gauche est spécialisé dans le traitement temporel, et plus spécialement, dans le traitement du voisement, ce qui expliquerait la diminution des performances de discrimination du voisement qui serait lié à un très bon fonctionnement du système efférent droit. Serniclaes, Van Heghe, Mousty, Carré et Sprenger-Charolles (2004) ont montré que les dyslexiques étaient moins catégoriels : ils continuent à catégoriser un /ba/ alors que la durée du voisement est très courte et que les contrôles catégorisent un /pa/. Leur frontière phonémique est décalée vers la droite. L'hyperactivité du système efférent droit pourrait être impliquée dans cette moins bonne capacité à catégoriser selon le voisement.

5.3.6. Expérience 2 : Compression temporelle du trait de lieu d'articulation

5.3.6.1. Comparaison entre les trois groupes

Le test t pour des échantillons indépendants a permis de montrer des différences significatives entre les groupes. Le groupe NL a des performances d'identification supérieures que DLOD pour C1 et CVCV et que DLOG pour CVCV (Tableau 33 et Figure 83).

Tableau 33 : Taux d'identification correcte (%) de C1, C2 et CVCV, dans l'Expérience 1, pour les 3 groupes NL, DLOD et DLOG. Résultats de tests t, comparaison entre NL et DLOD et NL et DLOG (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$). L'écart-type est entre parenthèses (σ).

	NL	DLOD	DLOG	t_{28}	p
C1	95.1 (3.4)	89.7 (7.6)	92.3 (5.4)	2.72 / 1.69	* / ns
C2	98.4 (1.4)	98.1 (2.3)	97.5 (1.8)	0.35 / 1.44	ns
CVCV	93.4 (3.7)	88.6 (7.9)	89.7 (5.8)	2.31 / 2.17	* / *

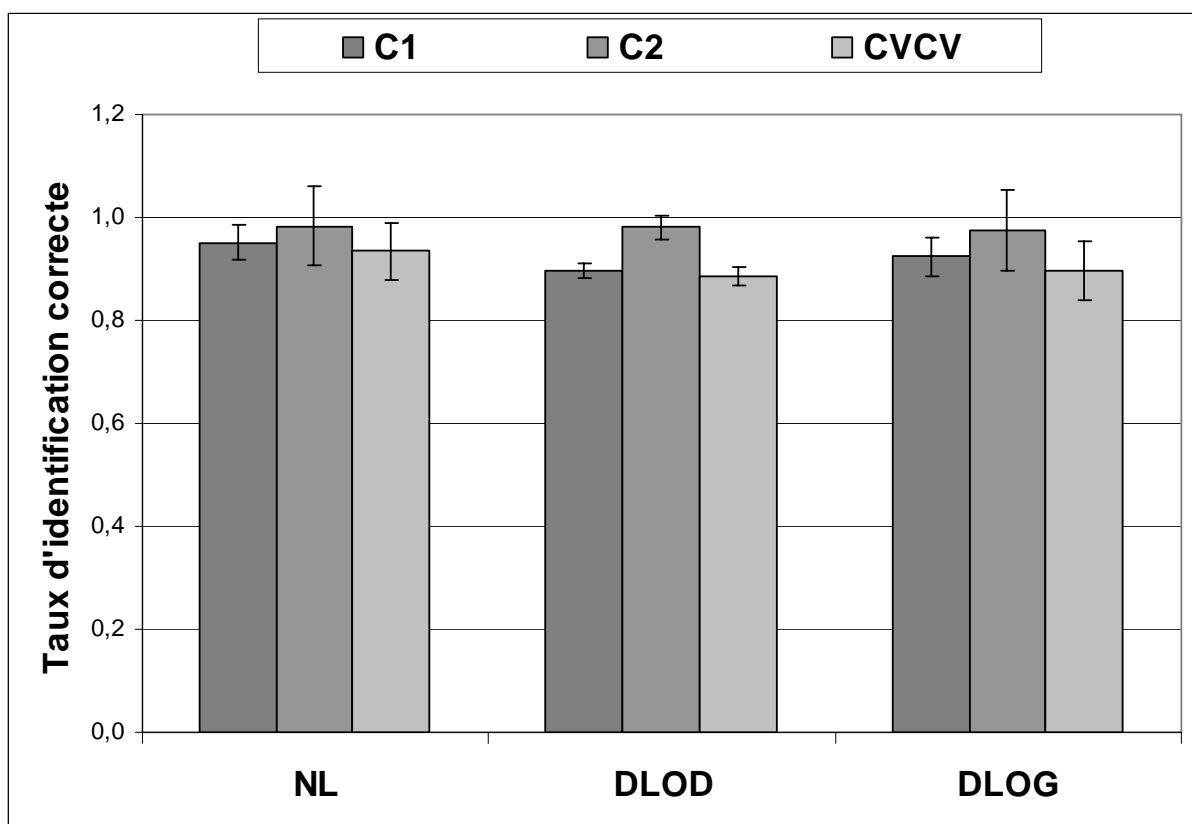


Figure 83 : Performances d'identification de la consonne d'attaque (C1), de la consonne intervocalique (C2) et du pseudo-mot (CVCV) pour les trois groupes NL, DLOD et DLOG.

5.3.6.2. Corrélation du fonctionnement du SEOCM et des performances d'identification auditive des consonnes

Un test de Pearson entre les variables audiométriques et les variables comportementales pour chaque groupe montre deux corrélations négatives significatives pour le groupe DLOG. L'AE mesurées sur l'oreille gauche corrèle avec le taux d'identification de la consonne d'attaque ($r = -0.65$; $p < .05$) et du pseudo-mot entier ($r = -0.66$; $p < .05$). Plus l'AE sur l'oreille gauche est forte, meilleures sont les performances des taux d'identification de C1 et de CVCV (Figure 84 et Figure 85).

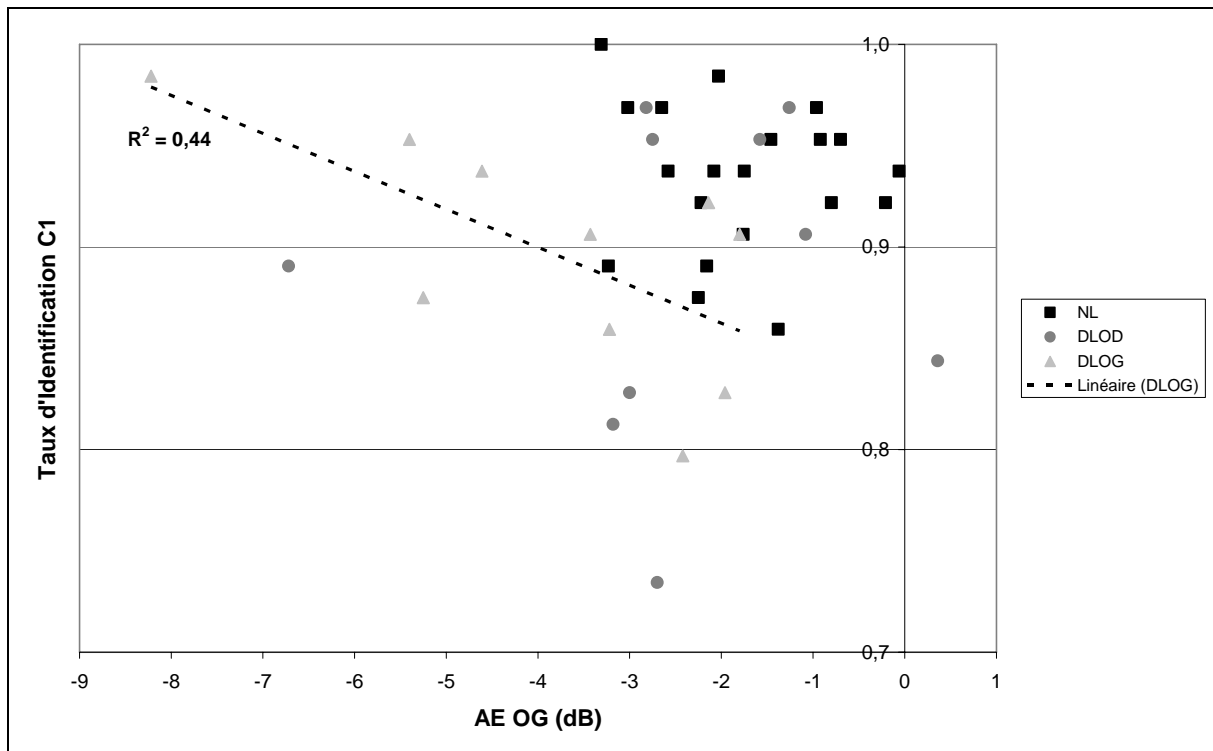


Figure 84 : Corrélation entre l'atténuation équivalente de l'oreille gauche (OG) et le taux d'identification de la consonne d'attaque (C1) chez le groupe DLOG (Courbe de tendance).

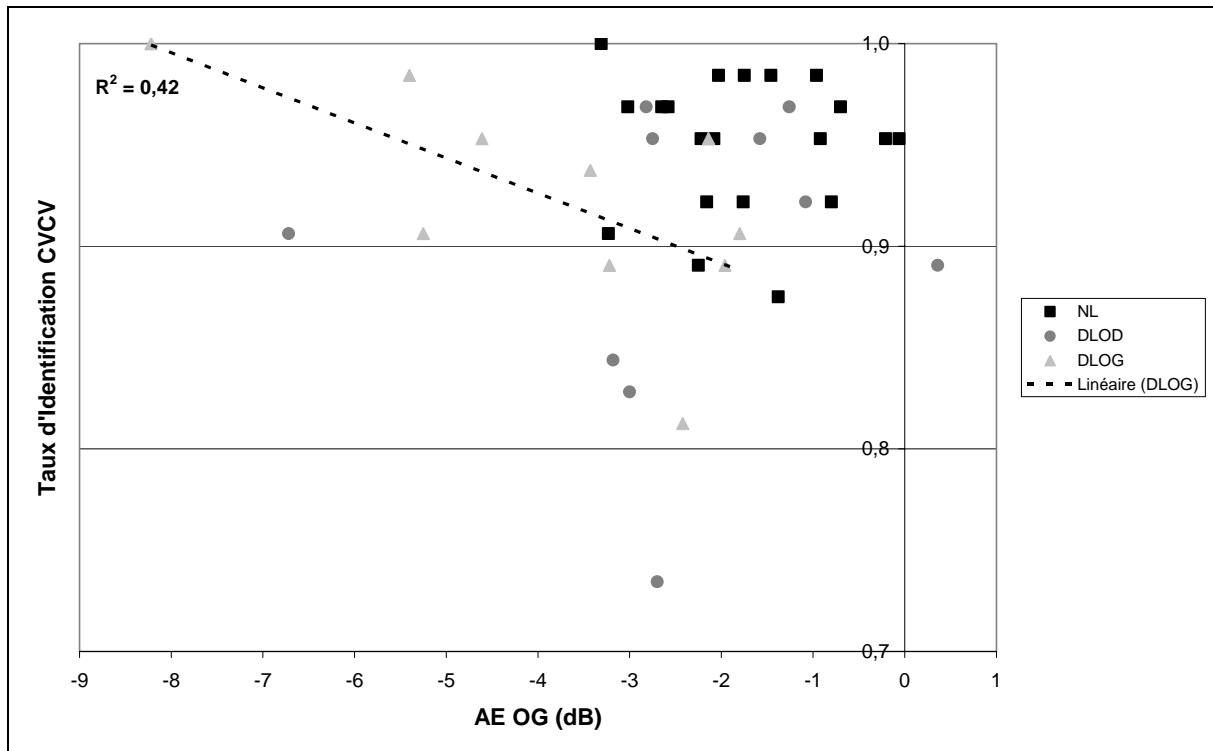


Figure 85 : Corrélation entre l'atténuation équivalente de l'oreille gauche (OG) et le taux d'identification des pseudo-mots chez le groupe DLOG (Courbe de tendance).

5.3.6.3. Discussion

Dans l'Expérience 2, nous avons réduit la durée des transitions, les DLOD montrent des difficultés à identifier les consonnes en attaque, mais pas les DLOG. Les DLOD sont plus sensibles, que les DLOG, à la réduction temporelle de l'indice du lieu d'articulation. Cependant, les performances sur la consonne d'attaque et le pseudo-mot du groupe DLOG sont corrélées aux mesures du SEOCM. Leurs performances de discrimination du lieu d'articulation sont meilleures lorsque l'atténuation équivalente de l'oreille gauche est plus grande. Chez les DLOG, nous avons vu que l'AE de l'oreille gauche est plus ample que celle de l'oreille droite. Les DLOG ont un système efférent latéralisé à gauche. Cette asymétrie, inverse aux témoins et aux DLOD, semble bénéfique pour ce groupe. Les voies auditives descendantes sont croisées, l'hémisphère droit est spécialisé dans le traitement fréquentiel ce qui expliquerait les bonnes performances de discrimination fréquentielle de la F2 qui corrèlent avec un bon fonctionnement du système efférent gauche. Cependant, cette corrélation n'apparaît pas chez les NL ce qui peut suggérer que les DLOG sont sensibles aux changements fréquentiels rapides.

5.4. Discussion Générale

Pour mieux connaître les bases neurophysiologiques déficitaires chez les dyslexiques, nous avons procédé à une exploration objective des voies auditives descendantes, impliquées dans les phénomènes d'interaction réciproque cochléaire (Collet et al., 1990) et fonctionnant probablement sous contrôle central (Khalifa, Bougeard et al., 2001). Nous mettons en évidence des troubles auditifs chez les dyslexiques, qui peuvent être reliés à certaines habiletés phonologiques fortement impliquées dans l'apprentissage de la lecture.

5.4.1. Les traits acoustiques

Nos résultats suggèrent que le groupe DLOD est plus sensible au trait de voisement que le groupe DLOG, et inversement, le groupe DLOG est plus sensible au trait de lieu d'articulation. Ces différences sur le traitement des traits reflèteraient les différences d'asymétrie des deux sous-groupes de dyslexiques. En effet, l'atténuation équivalente droite est supérieure chez les DLOD ce qui correspond à système efférent droit plus efficace. Les voies auditives descendantes étant croisées, les données du groupe DLOD rendent compte de la spécialisation des aires auditives de l'hémisphère gauche pour le traitement temporel du voisement. Et inversement, l'atténuation équivalente de l'oreille gauche est supérieure chez les DLOG ce qui rend compte de la spécialisation de l'hémisphère droit pour le traitement fréquentiel des transitions des formants. Comme nous l'avons observé dans le Chapitre 2, le voisement est un bon indice temporel pour discriminer les occlusives voisées et non voisées. De même, les changements fréquentiels rapides de la transition du second formant est un indice pertinent pour identifier le lieu d'articulation des occlusives.

Des études ont montré un déficit de fonctionnement du SEOCM (non croisé) chez des enfants ayant des difficultés d'apprentissage, dans des tâches de catégorisation [ba]-[pa] (Veillet, Bazin, & Collet, 1999 ; Veillet, Magnan, Ecalle, Thai-Van, & Collet, 2007). Dans l'étude de Veillet et al. (1999), les dyslexiques plus sensibles à l'indice de voisement présentent également des voies auditives descendantes plus fonctionnelles, c'est-à-dire plus inhibitrices, dans l'oreille gauche, contrairement aux témoins. Une différence de latéralisation fonctionnelle semble expliquer les performances d'identification du continuum [ba]-[pa].

L'étude de Giraud et al. (2005) montre que les dyslexiques adultes montrant un déficit de discrimination auditive voisé/non voisé présentent des difficultés spécifiques de codage temporel pour les segments successifs du signal de parole. Veillet, Magnan, Ecalle, Thai-

Van et Collet (2007) cherchent à clarifier la nature du déficit auditif chez les dyslexiques en explorant le fonctionnement du SEOCM couplé à une évaluation quantitative de sensibilité au voisement en utilisant un test de perception catégorielle. L'étude montre que les enfants dyslexiques sont sensibles au voisement qui peut être associé à un fonctionnement anormal du SEOCM. Les enfants les plus touchés dans l'apprentissage de la lecture sont les mêmes qui sont les moins bons en perception catégorielle (la frontière catégorielle est plus tardive : les sujets normo-lecteurs identifient déjà /pa/ lorsque les dyslexiques identifient encore /ba/). Les dyslexiques sont très sensibles au voisement et continuent ainsi à percevoir le voisement alors qu'il est si petit qu'il n'est plus perçu par les normo-lecteurs. Ce qui suggère que leur codage neuronal du voisement est altéré ce qui induit des erreurs de perception du contraste voisé/non voisé. L'altération du codage pourrait être due à un déficit des processus inhibiteurs, par du bruit excessif dans les voies auditives ou par un meilleur degré de perception allophonique chez les dyslexiques (Serniclaes, Van Heghe, Mousty, Carré, & Sprenger-Charolles, 2004). Les enfants dyslexiques sont considérés comme « moins catégoriels » (Adlard & Hazan, 1998 ; Serniclaes, Sprenger-Charolles, Carré, & Demonet, 2001 ; Serniclaes, Van Heghe, Mousty, Carré, & Sprenger-Charolles, 2004) ou « moins juste » dans une tâche d'identification des contrastes phonétiques. Veuillet, Magnan, Ecalle, Thai-Van, & Collet (2007) mettent en évidence un effet de l'entraînement audio-visuel sur les capacités de perception des frontières phonémiques des dyslexiques, grâce à un meilleur établissement de la représentation perceptuelle du voisement.

Le voisement est connu pour être traité préférentiellement dans l'hémisphère gauche. Et le fonctionnement du SEOCM est connu pour avoir un avantage dans l'oreille de droite qui reflète la dominance hémisphérique du cortex auditif gauche dans les processus du langage.

5.4.2. L'encodage neuronal temporel

Les voies auditives descendantes transportent de l'information des centres de traitement de haut niveau jusqu'aux centres de plus bas niveau : des régions corticales au thalamus et au tronc cérébral pour terminer sur la cochlée (Huffman & Henson, 1990 ; Xiao & Suga, 2002). Davis et Johnsrude (2007) présentent une revue d'études sur les influences *top-down* du système auditif sur la perception de la parole. Les voies descendantes joueraient un rôle important dans l'activation du réglage perceptuel rapide responsable d'une perception robuste de formes très variables de la parole.

Un encodage neural anormal des informations auditives peut jouer un rôle important dans l'apparition de capacités langagières normales (Farmer & Klein, 1995 ; Tallal & Piercy, 1974) car cela induirait une mauvaise perception d'indices acoustiques cruciaux contenu dans le signal de parole. Nous avons mis en évidence dans nos expériences des difficultés plus importantes en attaque de mot. Nous pouvons penser que les premières millisecondes de l'encodage sont les plus critiques pour une identification correcte de la consonne. Chez les dyslexiques, il existerait donc un dysfonctionnement au début de l'encodage (peut être un délai) qui les amène à faire des erreurs. Une perception anormale (Wright et al., 1997), des traitements auditifs perturbés au niveau cortical (Kraus et al., 1996 ; Nagarajan et al., 1999) ou au niveau sous-cortical (Cunningham, Nicol, Zecker, Bradlow, & Kraus, 2001 ; McAnally & Stein, 1996) pour la parole et la non parole, ont été démontrés chez des enfants et des adultes qui présentaient des difficultés de langage. Des déficits dans l'encodage des signaux de parole ont été observés dans le silence au niveau sous-cortical et à la fois dans le silence et le bruit, à un niveau cortical chez des enfants ayant des troubles d'apprentissage du langage (Cunningham, Nicol, Zecker, Bradlow, & Kraus, 2001 ; Kraus et al., 1996 ; Schulte-Körne, Deimel, Bartling, & Remschmidt, 1998). Il est donc intéressant d'explorer la temporalité neuronale le long des voies auditives.

5.4.2.1. Le niveau sous-cortical

Des anomalies temporelles au niveau des potentiels évoqués auditifs du tronc cérébral indiquent un dysfonctionnement sous-cortical qui peut affecter aussi bien les voies afférentes que les voies efférentes (Skoff, Mersky, & Turner, 1980). Les avis divergent quant à l'intégrité de la synchronisation neuronale chez les dyslexiques. L'étude de King, Warrier, Hayes et Kraus (2002) présente des anomalies de synchronisation cérébrale alors que l'étude de Hari, Säskilähti, Helenius et Uutela (1999) montre que les dyslexiques n'ont pas de trouble au niveau de la synchronisation neuronale ce qui ne peut donc pas expliquer leur problème dans le traitement de segments de sons rapides. Cependant, un entraînement a permis d'améliorer la synchronisation neuronale (Hayes, Warrier, Nicol, Zecker, & Kraus, 2003 ; Russo, Nicol, Zecker, Hayes, & Kraus, 2005). Muchnick et al. (2004) suggèrent que les traitements auditifs au niveau périphérique et sous-cortical contribuent aux difficultés d'apprentissage du langage chez des enfants ayant des troubles des traitements auditifs ou APD (*Auditory Processing Disorder*). Une sensibilité fine au voisement nécessite un codage phonologique optimal de la durée du DEV. Le DEV est un segment temporel de la parole qui implique des processus de synchronisation. Wible, Nicol et Kraus (2005) observent des

enfants avec une temporalité du tronc cérébral dégradée qui présentent une meilleure réponse corticale de dégradation dans le bruit. Banai, Nicol, Zecker et Kraus (2005) suggèrent que cela peut être le résultat de feedback cortical anormal.

Nous penchons en faveur d'une synchronisation neuronale anormale chez les dyslexiques, au vu de nos résultats. Cette mauvaise synchronisation expliquerait l'effet de position observé en attaque de mot.

5.4.2.2. Le niveau cortical

Wible et al. (2005) montrent une forte corrélation entre les traitements auditifs sous-corticaux et corticaux chez des enfants normo-lecteurs. La synchronisation des mécanismes qui encodent l'information acoustique rapide au niveau du tronc cérébral contribue lorsqu'elle est augmentée à un traitement plus robuste au niveau cortical. Dans le cas d'un traitement anormal des éléments acoustiques de la parole, les capacités développementales du langage sont perturbées. Des troubles à un niveau neurophysiologique entraînera donc une mauvaise perception de la parole et par conséquent, des troubles d'apprentissage du langage. Galaburda (1993) montrait des anomalies anatomiques au niveau thalamique et cortical chez des sujets ayant des troubles d'apprentissage. Démonet, Thierry et Cardebat (2005) mettent en évidence une activation cérébrale anormale au niveau du cortex auditif chez les dyslexiques : une diminution d'activation du cortex temporo-pariétale gauche. Cette diminution est associée à une augmentation de l'activité temporo-pariétale spécifique pendant la lecture (Simos, Breier, Fletcher, Bergman, & Papanicolaou, 2000 ; Simos et al., 2000). De plus, une altération du pattern d'asymétrie de la M100 a été observée (Devlin et al., 2003 ; Edgar et al., 2006 ; Schönwiesner, Krumbholz, Rübsem, Fink, & von Cramon, 2007). Brunswick et Rippon (1994) démontrent que la latéralisation cérébrale est différente chez les dyslexiques.

L'amélioration de la lecture suite à un entraînement était associée à une augmentation de l'implication de l'hémisphère gauche correspondant à une normalisation de la sous-activation des régions de l'hémisphère gauche (Kujala & Näätänen, 2001 ; Shaywitz et al., 2004 ; Simos et al., 2002 ; Temple et al., 2000). Veillet et al. (2007) montrent un effet bénéfique d'un entraînement audio-visuel sur les déficits auditifs des dyslexiques. L'entraînement audio-visuel a également une influence sur la latéralisation fonctionnelle du système efférent. Notons que les déficits auditifs ne sont pas nécessaires ni suffisants pour observer des difficultés d'apprentissage de la lecture (Bailey & Snowling, 2002).

5.4.3. L'implication du SEOCM dans la perception de la parole compressée

L'effet d'inhibition du SEOCM peut être réduit ou absent dans des conditions d'écoute liées à des difficultés de perception de la parole, comme par exemple dans le bruit ou dans du cocktail party. Des adultes dyslexiques présentent des difficultés de perception de la parole dans le bruit corrélées à un dysfonctionnement du SEOCM (Grataloup, 2007). Une réduction de l'effet du SEOCM est également combinée à des confusions de vocales (Veuillet, Bazin, & Collet, 1999). Dans notre Expérience 2, une réduction de l'effet du SEOCM est corrélée à des confusions de consonnes lorsque le trait de lieu d'articulation est raccourci chez les DLOG. Ce résultat est donc en accord avec les études précédentes. Il faut remarquer que l'asymétrie fonctionnelle de ce groupe DLOG est inversée par rapport aux témoins. Au contraire, dans l'Expérience 1, une réduction de l'effet du SEOCM est corrélée à une baisse des erreurs lorsque le trait de voisement est raccourci chez les DLOD. On peut donc faire l'hypothèse d'une implication du SEOCM dans le traitement et l'intégration temporelle d'indices acoustiques rapides et transitoires (voisement et transitions) chez les dyslexiques. Les différences d'asymétrie cérébrale des dyslexiques par rapport aux témoins pourraient donc refléter le déficit de traitement auditif temporel qui pourrait être présent dans certains troubles du langage.

5.5. Conclusion

Nous pouvons nous demander pourquoi les DLOG présentent un pattern d'asymétrie cérébrale inverse et pourquoi les DLOD présentent un pattern d'asymétrie semblable aux témoins, mais plus marqué. Nous pouvons émettre l'hypothèse selon laquelle les processus de compensation mis en place lors de l'apprentissage de la lecture par les dyslexiques suivent deux voies anatomiques différentes reflétant un phénomène de plasticité cérébrale chez les adultes dyslexiques. Une activation compensatoire et un développement de la dominance de l'hémisphère droit apparaîtraient chez les dyslexiques pour le traitement des consonnes de la parole, ce qui soutient le lien entre la sensibilité au voisement et l'avantage du SEOCM de l'oreille gauche. Il a d'ailleurs été décrit une latéralisation cérébrale anormale chez les dyslexiques (Stein, 1994). Des études plus approfondies sur les remaniements cérébraux suite à des méthodes de rééducation seraient à envisager pour en savoir davantage sur ces différences anatomo-fonctionnelles entre les sous-groupes de dyslexiques (établis sur la base du fonctionnement du SEOCM).

Nous avons observé une variabilité interindividuelle dans le groupe des dyslexiques, plus faible chez les témoins comme l'avait observé précédemment Veillet et al. (1991). Cette variabilité pourrait être due à un fonctionnement interindividuel différent du système efférent (Maison, Micheyl, & Collet, 1997). Veillet et al. (2007) ont décrit deux enfants dyslexiques (parmi les 24 testés) qui montraient un SEOCM latéralisé à droite ce qui rejoint nos résultats pour le groupe DLOD. Les méthodes d'entraînement doivent donc prendre en compte ces différents types fonctionnement des voies auditives chez les dyslexiques et cette hétérogénéité entre les enfants dyslexiques afin de cibler les points essentiels à rééduquer.

Conclusion Générale

Dans les modèles classiques de reconnaissance des mots parlés, les premières étapes entre l'entrée auditive et les unités phonémiques font appel à des phénomènes de segmentation du signal de parole et de catégorisation des segments selon des traits distinctifs. L'exécution de ces deux processus est complexe du fait de la variabilité importante du signal de parole. Cette variabilité peut émerger aussi bien de facteurs intrinsèques au locuteur que de facteurs extrinsèques de l'environnement. Dans cette thèse, nous avons mentionné à la fois, des facteurs intrinsèques, comme les phénomènes de coarticulation ou d'assimilation et, des facteurs extrinsèques, comme le bruit ou la compression temporelle artificielle du signal de parole. Cette grande variabilité du signal acoustique rend donc difficile l'établissement de correspondances biunivoques entre un son de parole et sa représentation phonémique. Les phonèmes sont décrits grâce à des traits phonétiques et les indices acoustiques qui leurs correspondent. Ces indices acoustiques peuvent être coarticulés ou assimilés mais ces effets dépendent du poids relatif de chaque indice dans l'identification de la parole ainsi que de la nature des indices. Les indices acoustiques n'ont pas tous la même importance dans la reconnaissance des mots et cette différence peut être due à la nature spectro-temporelle de l'indice. Dans ce travail de thèse, nous avons voulu, dans un premier temps, étudier le poids relatif de deux traits phonétiques : le voisement et le lieu d'articulation, dans l'identification de pseudo-mots CVCV, dont les consonnes ne sont que des occlusives qui se différencient par un ou deux traits. Dans un second temps, nous avons émis l'hypothèse que le trait de voisement (barre de voisement et VOT) était de nature temporelle (« source ») alors que le trait de lieu d'articulation (transitions formantiques) était de nature spectro-temporelle (« filtre »). Cette hypothèse a permis de comparer les deux types de traitements selon la nature acoustique des indices. De plus, dans des conditions d'écoute difficiles correspondant à de la parole compressée temporellement, nous avons examiné l'effet de cette dégradation du signal sur les représentations des traits phonétiques chez des adultes normo-entendants et experts en lecture. Selon les résultats obtenus dans le Chapitre 2, il existe un traitement différentiel des

deux indices acoustiques. Le trait de voisement apparaît plus sensible à la compression temporelle que le trait de lieu d'articulation, ce qui suggère que la durée des transitions n'est pas un indice pertinent dans l'identification de la parole mais que les changements fréquentiels rapides sont un indice acoustique saillant. Le trait de voisement, lui, est un bon indice temporel. Par ailleurs, il a été montré que ces deux traits peuvent être traités de manière indépendante, en parallèle ou bien de manière interactive c'est-à-dire que les effets de compression temporelle de chaque indice vont s'ajouter. Cette relation dépend de la nature des indices acoustiques manipulés. De plus, un effet de la redondance des indices acoustiques a été mis en évidence, particulièrement sur l'identification de la consonne en position intervocalique. Une analyse acoustique de la durée des indices (et de la pente des transitions) a été menée, dans le but d'évaluer dans quelle mesure les effets de compression étaient dus à la nature ou à la durée de l'indice manipulé. Globalement, les durées des indices corrélaient avec les performances d'identification des consonnes quand les deux indices étaient compressés. Nous pouvons suggérer que l'identification se base sur la nature des indices lorsqu'un seul trait phonétique est dégradé et qu'elle se base sur la durée lorsque deux ou plusieurs traits sont altérés. Cette première étude met en avant un traitement auditif temporel différentiel selon la nature de l'indice acoustique.

Dans le Chapitre 3, nous avons examiné l'importante variabilité interindividuelle observée dans nos expériences comportementales. Cette variabilité a été corrélée, d'une part, à des mesures auditives de bas niveau et, d'autre part, aux capacités cognitives phonologiques des participants en lecture. Des corrélations phonologiques ont permis d'expliquer cette variabilité interindividuelle : les participants les moins performants dans la tâche d'identification auditive des pseudo-mots compressés sur des traits phonétiques présentaient des difficultés à établir des correspondances grapho-phonémiques reflétant une organisation et des représentations imprécises et peu détaillées des traits phonétiques, ce qui ralentit leur lecture. Ces troubles de langage font penser à ceux décrits dans la dyslexie.

L'étude d'une population pathologique ayant des troubles d'apprentissage de la lecture a été menée dans le Chapitre 4. Une des principales théories cognitives explicatives de la dyslexie est la théorie d'un déficit général de traitement auditif temporel. Or, nous explorons les performances d'identification auditive de pseudo-mots compressés de dyslexiques adultes comparées à celles de sujets contrôles appariés. De manière générale, la réduction temporelle

d'indices brefs et rapides (voisement, VOT, transitions) a plus d'effet chez les dyslexiques que chez les témoins. Les dyslexiques sont plus sensibles à la durée de voisement qu'à la durée des transitions. Par contre, il semblerait que le traitement spectral soit défaillant chez les dyslexiques. Ce chapitre est donc en faveur d'un déficit de traitement auditif temporel des sons de parole chez les dyslexiques adultes.

Afin d'appuyer ce dernier résultat, nous avons exploré le fonctionnement du système auditif périphérique et central chez un groupe de dyslexiques appariés à un groupe témoin (Chapitre 5). Le système efférent olivocochléaire fait l'objet d'une évaluation fonctionnelle pour les deux groupes et les données sont ensuite comparées entre les deux groupes. Les dyslexiques adultes peuvent se diviser en deux sous-groupes (10 participants dans chaque groupe) : le premier sous-groupe présente une dominance fonctionnelle du SEOCM sur l'oreille droite (DLOD) et le second sous-groupe, à l'inverse, manifeste une dominance fonctionnelle du SEOCM sur l'oreille gauche. Les dyslexiques présentent, tous, une asymétrie centrale atypique qui est corrélée à leurs performances dans la tâche auditive d'identification de pseudo-mots compressés selon l'indice acoustique manipulé. En effet, une dominance fonctionnelle du SEOCM à droite est corrélée avec une sensibilité au trait de voisement chez les dyslexiques DLOD alors qu'une dominance opposée est corrélée à une sensibilité au trait de lieu d'articulation chez les DLOG. Les dyslexiques mettraient donc en place des mécanismes compensatoires au moment de l'acquisition de la lecture qui impliqueraient une réorganisation cérébrale des représentations des traits phonétiques. Par conséquent, les DLOD traitent préférentiellement les indices temporels dans l'hémisphère gauche alors que les DLOG privilégient le traitement spectral dans l'hémisphère droit.

En conclusion, nous pouvons envisager d'autres études portant sur le rôle et la nature des indices acoustiques dans la perception de la parole chez les dyslexiques. En effet, d'une part, les processus neuronaux impliqués dans le traitement temporel des indices acoustiques dépendent de leur nature temporelle, spectrale ou spectro-temporelle. Cependant, des points restent à éclaircir sur les déficits de traitement du signal de parole chez les dyslexiques. Un des axes de recherche à envisager est l'utilisation de techniques électrophysiologiques et d'imagerie cérébrale pour observer de manière plus précise les mécanismes cérébraux et les aires corticales impliquées dans les déficits de perception de la parole. L'électrophysiologie,

et notamment, l'étude de la MMN est une méthode prometteuse, rapide, facile et efficace pour obtenir un profil neurophysiologique des indices acoustiques anormalement traités par le système auditif. D'autre part, nous soulignons l'intérêt majeur de s'intéresser à la dyslexie chez l'adulte. En effet, les adultes dyslexiques présentent, comme les enfants, une plasticité cérébrale suite à un entraînement adapté. Ce résultat permet donc de donner un poids aux méthodes de rééducation chez l'adulte dyslexique qui peut donc, même tardivement, améliorer ses capacités en lecture, par exemple. De plus, si l'on considère que les adultes présentent encore certaines difficultés phonologiques, visuelles ou motrices liées à la dyslexie, l'étude chez les adultes est méthodologiquement et éthiquement plus simple que chez les enfants.

BIBLIOGRAPHIE

- Abramson, A. S., & Lisker, L. (1970). *Discriminability along the voicing continuum: Cross-language tests*. Paper presented at the Sixth International Congress of Phonetic Sciences, Prague: Academia.
- Adlard, A., & Hazan, V. (1998). Speech perception in children with specific reading difficulties (dyslexia). *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *51*, 153-177.
- Ahissar, M., Protopapas, A., Reid, M., & Merzenich, M. M. (2000). Auditory processing parallels reading abilities in adults. *Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america*, *97*, 6832-6837.
- AmericanPsychiatricAssociation. (2004). *DSM-IV-TR : manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux*. Paris: Editions Masson.
- Andruski, J. E., Blumstein, S. E., & Burton, M. (1994). The effect of subphonetic differences on lexical access. *Cognition*, *52*, 163-187.
- Ashburner, J., & Friston, K. J. (2000). Voxel-based morphometry—The methods. *NeuroImage*, *11*, 805-821.
- Axelsson, A., Jerson, T., Lindberg, U., & Lindgren, F. (1981). Early noise-induced hearing loss in teenage boys. *Scandinavian Audiology. Supplementum*, *10*, 91-96.
- Baayen, R. H. (2008). *Analyzing linguistic data: A practical introduction to statistics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Baayen, R. H., Davidson, D. J., & Bates, D. M. (2008). Mixed-effects modeling with crossed random effects for subjects and items. *Journal of Memory and Language*, *in press*.
- Baddeley, L. (1986). *Working memory*. New York: Oxford University Press.
- Bailey, P. J., & Snowling, M. J. (2002). Auditory processing and the development of language and literacy. *British Medical Bulletin*, *63*, 135-146.
- Banai, K., & Kraus, N. (2006). Neurobiology of (central) auditory processing disorder and language-based learning disability. In G. D. Chermak & F. E. Musiek (Eds.), *Handbook of Central Auditory Processing Disorder: Volume I: Auditory Neuroscience and Diagnosis* (pp. 89-116). San Diego: Plural Publishing Inc.
- Banai, K., Nicol, T., Zecker, S. G., & Kraus, N. (2005). Brainstem timing: Implications for cortical processing and literacy. *The Journal of Neuroscience*, *25*, 9850-9857.
- Banel, M.-H., & Bacri, N. (1997). Reconnaissance de la parole et indices de segmentation métriques et phonotactiques. *L'Année psychologique*, *97*, 77-112.
- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (1999). *Neuroscience, à la découverte du cerveau*: Pradel.
- Beaton, A. A., McDougall, S., & Singleton, C. (1997). Editorial humpty dumpty grows up? - Diagnosing dyslexia in adulthood. *Journal of Research in Reading*, *20*, 1-6.
- Bedoin, N. (2003). Sensitivity to voicing similarity in printed stimuli: Effect of a training programme in dyslexic children. *Journal of Phonetics*, *31*, 541-546.
- Bedoin, N., & Krifi, S. (à paraître). The complexity of phonetic features organisation in reading. In F. Pellegrino, E. Marsico, I. Chitoran & C. Coupé (Eds.), *Approaches to phonological complexity*: Mouton and de Gruyter.
- Békésy, G. (1960). *Experiments in hearing*. New-York: McGraw-Hill.
- Berent, I., & Perfetti, C. A. (1995). A rose is a REEZ: The two-cycles model of phonology assembly in reading english. *Psychological Review*, *102*, 146-184.

- Bertelson, P., Morais, J., Alegria, J., & Content, A. (1985). Phonetic analysis capacity and learning to read. *Nature*, *313*, 73-74.
- Binder, J. R., Frost, J. A., Hammeke, T. A., Cox, R. W., Rao, S. M., & Prieto, T. (1997). Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience*, *17*, 353-362.
- Blumstein, S. E., & Stevens, K. N. (1979). Acoustic invariance in speech production: Evidence from measurements of the spectral characteristics of stop consonants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *66*, 1001-1017.
- Boder, E. (1973). Developmental dyslexia: A diagnostic approach based on three atypical reading-spelling patterns. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *15*, 663-687.
- Bogliotti, C., Serniclaes, W., Messaoud-Galusi, S., & Sprenger-Charolles, L. (in press). Discrimination of speech sounds by children with dyslexia: Comparisons with chronological age and reading level controls. *Journal of Experimental Child Psychology*.
- Bosse, M.-L., & Valdois, S. (2002). *Phonological and visual processing in dyslexic children: A group study (Traitements phonologiques et visuels chez l'enfant dyslexique : une étude de groupe)*. Paper presented at the Annual meeting of the Société de Neuropsychologie de Langue Française, Paris.
- Bradley, L., & Bryant, P. E. (1983). Categorising sounds and learning to read: A causal connexion. *Nature*, *301*, 419-421.
- Bradley, L., & Bryant, P. E. (1985). *Rhyme and reason in reading and spelling. International academy for research in learning disabilities monograph series No. 1*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Bradlow, A. R., Kraus, N., & Hayes, E. (2003). Speaking clearly for children with learning disabilities: Sentence perception in noise. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *46*, 80-97.
- Bradlow, A. R., Kraus, N., Nicol, T. G., McGee, T. J., Cunningham, J., Zecker, S. G., et al. (1999). Effects of lengthened formant transition duration on discrimination and neural representation of synthetic CV syllables by normal and learning-disabled children. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *106*, 2086-2096.
- Brady, S., Shankweiler, D. P., & Mann, V. (1983). Speech perception and memory coding in relation to reading ability. *Journal of Experimental Child Psychology*, *35*, 345-367.
- Brambati, S. M., Termine, C., Ruffino, M., Stella, G., Fazio, F., Cappa, S. F., et al. (2004). Regional reductions of gray matter volume in familial dyslexia. *Neurology*, *63*, 742-745.
- Bray, P., & Kemp, D. T. (1987). An advanced cochlear echo technique suitable for infant screening. *British Journal of Audiology*, *21*, 191-204.
- Bregman, A. S. (1990). *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound*. Cambridge: Bradford Books
MIT Press.
- Broca, P. (1865). Sur le siège de la faculté du langage articulé [On the localization of the faculty of articulated language]. *Bulletin of the Society of Anthropology*, *6*, 377-396.
- Brown, J. I., Fishco, V. V., & Hanna, G. S. (1993). *Nelson-Denny reading test: Manual for scoring and interpretation, forms G & H*. Itasca, Illinois: Riverside Publishing.
- Brown, W. E., Eliez, S., Menon, V., Rumsey, J. M., White, C. D., & Reiss, A. L. (2001). Preliminary evidence of widespread morphological variations of the brain in dyslexia. *Neurology*, *56*, 781-783.
- Brownell, W. E. (1983). Observations on a motile response in isolated outer hair cells. In W. R. Webster & L. M. Aitken (Eds.), *Mechanisms of Hearing* (pp. 5-10): Monash University Press.

- Brownell, W. E. (1990). Outer hair cell electromotility and otoacoustic emissions. *Ear and Hearing, 11*, 82-92.
- Bruck, M. (1990). Word-recognition skills of adults with childhood diagnoses of dyslexia. *Developmental Psychology, 26*, 439-454.
- Bruck, M. (1992). Persistence of dyslexics' phonological awareness deficits. *Developmental Psychology, 28*, 874-886.
- Bruck, M. (1998). Outcomes of adults with childhood histories of dyslexia. In C. Hulme & M. Joshi (Eds.), *Cognitive and linguistic bases of reading, writing, and spelling* (pp. 179-200). Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bruck, M., & Treiman, R. (1990). Phonological awareness and spelling in normal children and dyslexics: The case of initial consonant clusters. *Journal of Experimental Child Psychology, 50*, 156-178.
- Brunswick, N., & Rippon, G. (1994). Auditory event-related potentials, dichotic listening performance and handedness as indices of lateralisation in dyslexic and normal readers. *International Journal of Psychophysiology, 18*, 265-275.
- Brybaert, M. (2007). *"The language-as-fixed-effect fallacy": Some simple SPSS solutions to a complex problem*. Royal Holloway, University of London.
- Burns, E. M., Arehart, K. H., & Campbell, S. L. (1992). Prevalence of spontaneous otoacoustic emissions in neonates. *The Journal of the Acoustical Society of America, 91*, 1571-1575.
- Calliope. (1989). La parole et son traitement automatique. In Masson (Ed.).
- Cardon, L. R., Smith, S. D., Fulker, D. W., Kimberling, W. J., Pennington, B. F., & DeFries, J. C. (1994). Quantitative trait locus for reading disability on chromosome 6. *Science, 266*, 276-279.
- Carlyon, R. P. (2004). How the brain separates sounds. *Trends in Cognitive Sciences, 8*, 465-471.
- Carré, R., & Chennoukh, S. (1995). Vowel-consonant-vowel modeling by superposition of consonant closure on vowel-to-vowel gestures. *Journal of Phonetics, 23*, 231-241.
- Carré, R., Serniclaes, W., & Marsico, E. (2003). *Formant transition duration versus prevoicing duration in voiced stop identification*. Paper presented at the 15th ICPhS, Barcelone.
- Casagrande, J. (1984). *The sound system of french*. Washington, DC: Georgetown University Press.
- Castles, A., & Coltheart, M. (1993). Varieties of developmental dyslexia. *Cognition, 47*, 149-180.
- Cazals, Y. (1994). Occlusive silence duration of voiceless intervocalic plosives and voicing perception by normal and hearing-impaired subjects. *Ear and Hearing, 15*, 404-408.
- Charpentier, F. J., & Stella, M. G. (1986). *Diphone synthesis using an overlap-add technique for speech waveforms concatenation*. Paper presented at the IEEE International Conference ASSP, Tokyo.
- Cherry, E. C. (1953). Some experiments on the recognition of speech, with one or two ears. *The Journal of the Acoustical Society of America, 25*, 975-979.
- Chéry-Croze, S., Moulin, A., Collet, L., & Morgon, A. (1994). Is the test of medial efferent system function a relevant investigation in tinnitus? *British Journal of Audiology, 28*, 13-25.
- Clark, H. H. (1973). The language-as-fixed effect fallacy: A critique of language statistics in psychological research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 12*, 335-359.

- Collet, L., Kemp, D. T., Veuille, E., Duclaux, R., Moulin, A., & Morgon, A. (1990). Effect of contralateral auditory stimuli on active cochlear micro-mechanical properties in human subjects. *Hearing Research*, *43*, 251-261.
- Collet, L., Levy, V., Veuille, E., Truy, E., & Morgon, A. (1993). Click-evoked otoacoustic emissions and hearing threshold in sensorineural hearing loss. *Ear & Hearing*, *14*, 141-143.
- Collet, L., Rogé, B., Descouens, D., Moron, P., Duverdy, F., & Urgell, H. (1993). Objective auditory dysfunction in infantile autism. *Lancet*, *342*, 923-924.
- Collet, L., Veuille, E., Bene, J., & Morgon, A. (1992). Effects of contralateral white noise on click-evoked emissions in normal and sensorineural ears: Towards an exploration of the medial olivocochlear system. *Audiology*, *31*, 1-7.
- Collet, L., Veuille, E., Moulin, A., Morlet, T., Giraud, A. L., Micheyl, C., et al. (1994). Contralateral auditory stimulation and otoacoustic emissions: A review of basic data in humans. *British Journal of Audiology*, *28*, 213-218.
- Colombo, J., & Bundy, R. (1983). Infant response to auditory familiarity and novelty. *Infant Behavior and Development*, *6*, 305-311.
- Coltheart, M. (1978). Lexical access in simple reading tasks. In G. Underwood (Ed.), *Strategies of information processing*. New York: Academic Press.
- Coltheart, M., Masterson, J., Byng, S., Prior, M., & Riddoch, J. (1983). Surface dyslexia. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *35*, 469-495.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. C. (2001). DRC: A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, *108*, 204-256.
- Cornelissen, P. L., Hansen, L., Bradley, L., & Stein, J. F. (1996). Analysis of perceptual confusions between nine sets of consonant-vowel sounds in normal and dyslexic adults. *Cognition*, *59*, 275-306.
- Cornelissen, P. L., Richardson, A., Mason, A., Fowler, S., & Stein, J. F. (1995). Contrast sensitivity and coherent motion detection measured at photopic luminance levels in dyslexics and controls. *Vision Research*, *35*, 1483-1494.
- Crottaz-Herbette, S., & Ragot, R. (2000). Perception of complex sounds: N1 latency codes pitch and topography codes spectra. *Clinical Neurophysiology*, *111*, 1759-1766.
- Cunningham, J., Nicol, T. G., Zecker, S. G., Bradlow, A. R., & Kraus, N. (2001). Neurobiologic responses to speech in noise in children with learning problems: Deficits and strategies for improvement. *Clinical Neurophysiology*, *112*, 758-767.
- Cutler, A., & Norris, D. (1988). The role of strong syllables in segmentation for lexical access. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *14*, 113-121.
- Davis, H. (1983). An active process in cochlear mechanics. *Hearing Research*, *9*, 79-90.
- Davis, M. H., & Johnsrude, I. S. (2007). Hearing speech sounds: Top-down influences on the interface between audition and speech perception. *Hearing Research*, *229*, 132-147.
- de Bree, E., Wilsenach, C., Gerrits, E., & Wijnen, F. (2003, 1-4 July). *Phonological processing and working memory in children at risk for dyslexia and children with SLI*. Paper presented at the The International Child Phonology Conference, Vancouver.
- De Venecia, R. K., Liberman, M. C., Guinan Jr, J. J., & Brown, M. C. (2005). Medial olivocochlear reflex interneurons are located in the posteroventral cochlear nucleus: A kainic acid lesion study in guinea pigs. *Journal of Comparative Neurology*, *487*, 345-360.
- Dehaene-Lambertz, G., Pallier, C., Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., Jobert, A., & Dehaene, S. (2005). Neural correlates of switching from auditory to speech perception. *NeuroImage*, *24*, 21-33.

- Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., & Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: Behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, 284, 970-974.
- Déjerine, J. (1892). Contribution à l'étude anatomo-pathologique et clinique des différentes variétés de cécité verbale. *Mémoires de la Société de Biologie*, 4, 61-90.
- Delattre, P. C. (1958). Les indices acoustiques de la parole. Premier rapport. *Phonetica* 2, 108-118, 210-251.
- Delattre, P. C. (1959). Rapports entre la durée vocalique, le timbre et la structure syllabique en français. *The French Review*, 32, 547-552.
- Delattre, P. C. (1966a). *Studies in French and Comparative Phonetics: selected papers in French and English*. Paris, France: The Hague Mouton & Co.
- Delattre, P. C. (1966b). Tendances de coupe syllabique en français. In Mouton (Ed.), *Studies in French and Comparative Phonetics* (pp. 150-162). The Hague.
- Delattre, P. C. (1966c). Un triangle acoustique des voyelles du français. In *Studies in French and comparative phonetics*. La Haye: Mouton.
- Delattre, P. C., Liberman, A. M., & Cooper, F. S. (1955). Acoustic loci and transitional cues for consonants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 27, 769-773.
- Démonet, J. F., Taylor, M., & Chaix, Y. (2004). Developmental dyslexia. *Lancet*, 363, 1451-1460.
- Démonet, J. F., Thierry, G., & Cardebat, D. (2005). Renewal of the neurophysiology of language: Functional neuroimaging. *Physiological Reviews*, 85, 49-95.
- Devlin, J. T., Raley, J., Tunbridge, E., Lanary, K., Floyer-Lea, A., Narain, C., et al. (2003). Functional asymmetry for auditory processing in human primary auditory cortex. *The Journal of Neuroscience*, 23, 11516-11522.
- Dolan, D. F., & Nuttall, A. L. (1988). Masked cochlear whole-nerve response intensity functions altered by electrical stimulation of the crossed olivocochlear bundle. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 1081-1086.
- Dorman, M. F., & Raphael, L. J. (1980). Distribution of acoustic cues for stop consonant place of articulation in VCV syllables. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 67, 1333-1335.
- Dorman, M. F., Studdert-Kennedy, M., & Raphael, L. J. (1977). Stop-consonant recognition: Release bursts and formant transitions as functionally equivalent, context-dependent cues. *Perception & Psychophysics*, 22, 109-122.
- Dos Santos, C. (2007). *Développement phonologique en français langue maternelle. Une étude de cas*. Université Lumière Lyon 2, Lyon, France.
- Drullman, R., Festen, J. M., & Plomp, R. (1994). Effect of temporal envelope smearing on speech reception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 95, 1053-1064.
- Dufor, O., Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., & Démonet, J.-F. (2007). Top-down processes during auditory phoneme categorization in dyslexia: A PET study. *NeuroImage*, 34, 1692-1707.
- Dumay, N., Content, A., & Frauenfelder, U. H. (1999). *Contribution de la structure syllabique de surface à la segmentation lexicale*. Paper presented at the 2èmes Journées d'Étude Linguistiques, Nantes.
- Dupoux, E., & Green, K. (1997). Perceptual adjustment to highly compressed speech: Effects of talker and rate changes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23, 914-927.
- Dupoux, E., & Mehler, J. (1990). Monitoring the lexicon with normal and compressed speech: Frequency effects and the prelexical code. *Journal of Memory and Language*, 29, 316-335.

- Dworczak, F., Bedoin, N., & Krifi, S. (sous presse). Internet et troubles d'apprentissage : les synergies et partenariats créés. In G. Pithon, S. Asdih & C. Larivée (Eds.), *Construire une communauté éducative : le partenariat familles - associations - écoles - universités*: De Boeck, Bruxelles, De Boeck, Collection Perspectives en éducation et formation.
- Ecalte, J., & Magnan, A. (2002). The development of epiphonological and metaphonological processing at the start of learning to read: A longitudinal study. *European journal of psychology of education, 17*, 47-62.
- Ecalte, J., & Magnan, A. (2002). *L'apprentissage de la lecture : Fonctionnement et développement cognitifs*. Paris: Colin.
- Eckert, M. A. (2004). Neuroanatomical markers for dyslexia: A review of dyslexia structural imaging studies. *Neuroscientist, 10*, 362-371.
- Eckert, M. A., & Leonard, C. M. (2000). Structural imaging in dyslexia: The planum temporale. *Mental Retardation and Developmental Disabilities Research Reviews, 6*, 198-206.
- Eckert, M. A., Leonard, C. M., Wilke, M., Eckert, M., Richards, T., Richards, A., et al. (2005). Anatomical signatures of dyslexia in children: Unique information from manual and voxel based morphometry brain measures. *Cortex, 41*, 304-315.
- Eden, G. F., Jones, K. M., Cappell, K., Gareau, L., Wood, F. B., Zeffiro, T. A., et al. (2004). Neural changes following remediation in adult developmental dyslexia. *Neuron, 44*, 411-422.
- Eden, G. F., VanMeter, J. W., Rumsey, J. M., Maisog, J. M., Woods, R. P., & Zeffiro, T. A. (1996). Abnormal processing of visual motion in dyslexia revealed by functional brain imaging. *Nature, 382*, 66-69.
- Edgar, J. C., Yeo, R. A., Gangestad, S. W., Blake, M. B., Davis, J. T., Lewine, J. D., et al. (2006). Reduced auditory M100 asymmetry in schizophrenia and dyslexia: Applying a developmental instability approach to assess atypical brain asymmetry. *Neuropsychologia, 44*, 289-299.
- Eimas, P. D., & Corbit, J. D. (1973). Selective adaptation of linguistic feature detectors. *Cognitive Psychology, 4*, 99-109.
- Eimas, P. D., & Miller, J. L. (1992). Organization in the perception of speech by young infants. *Psychological Science, 3*, 340-345.
- Eimas, P. D., Miller, J. L., & Jusczyk, P. W. (1987). On infant speech perception and the acquisition of language. In S. Harnad (Ed.), *Categorical perception: The groundwork of Cognition*. New York: Cambridge University Press.
- Eimas, P. D., Siqueland, E. R., Jusczyk, P. W., & Vigorito, J. (1971). Speech perception in infants. *Science, 171*, 303-306.
- Elbro, C., Nielsen, I., & Petersen, D. K. (1994). Dyslexia in adults: Evidence for deficits in non-word reading and in the phonological representation of lexical items. *Annals of Dyslexia, 44*, 203-226.
- Elliott, L. L., Hammer, M. A., & Scholl, M. E. (1989). Fine-grained auditory discrimination in normal children and children with language-learning problems. *Journal of Speech and Hearing Research, 32*, 112-119.
- Ellis, W. D. (1974). *A source book of Gestalt psychology*. London: Routledge and Kegan Paul.
- Elman, J. L., & McClelland, J. L. (1986). Exploiting lawful variability in the speech wave. In J. S. Perkell & D. H. Klatt (Eds.), *Invariance and variability in speech processes* (pp. 360-385). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Eybalin, M. (1993). Neurotransmitters and neuromodulators of the mammalian cochlea. *Physiological Reviews, 73*, 309-3373.

- Fabre, D., & Bedoin, N. (2003). Sensitivity to sonority in Normal readers and dyslexic children. *Current Psychology Letters. Special Issue on Language Disorders and Reading Acquisition, 1*, [En ligne], published on line on : 27 novembre 2006. URL : <http://cpl.revues.org/document2093.html>.
- Fant, G. (1960). *The acoustic theory of speech production*. Mouton, La Haye.
- Fant, G. (1973). *Speech Sounds and Features*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Farmer, M. E., & Klein, R. M. (1995). The evidence for a temporal processing deficit linked to dyslexia: A review. *Psychonomic Bulletin & Review, 2*, 460-493.
- Fawcett, A. J., & Nicolson, R. I. (1999). Performance of dyslexic children on cerebellar and cognitive tests. *Journal of Motor Behavior, 31*, 68-78.
- Fawcett, A. J., Nicolson, R. I., & Dean, P. (1996). Impaired performance of children with dyslexia on a range of cerebellar tasks. *Annals of Dyslexia, 46*, 259-283.
- Feldman, E., Levin, B. E., Fleischmann, J., Jallad, B., Kushch, A., Gross-Glenn, K., et al. (1995). Gender differences in the severity of adult familial dyslexia. *Reading and Writing, 7*, 155-161.
- Felton, R. H., Naylor, C. E., & Wood, F. B. (1990). Neuropsychological profile of adult dyslexics. *Brain and Language, 39*, 485-497.
- Ferrand, L. (2001). *Cognition et lecture : Processus de base de la reconnaissance des mots écrits chez l'adulte*. Bruxelles: De Boeck Université.
- Fiez, J. A., & Petersen, S. E. (1998). Neuroimaging studies of word reading. *Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america, 95*, 914-921.
- Fisher-Jørgensen, E. (1954). Acoustic analysis of stop consonants. *Miscellanea Phonetica, 2*, 42-59.
- Fisher-Jørgensen, E. (1972). Ptk et bdg français en position intervocalique accentuée. In A. Valdman (Ed.), *Papers in Linguistics and phonetics: to the memory of Pierre Delattre* (pp. 143-200). The Hague: Mouton.
- Fisher, S. E., & Francks, C. (2006). Genes, cognition and dyslexia: Learning to read the genome. *Trends in Cognitive Sciences, 10*, 250-257.
- Fisher, S. E., Francks, C., Marlow, A. J., MacPhie, I. L., Newbury, D. F., Cardon, L. R., et al. (2002). Independent genome-wide scans identify a chromosome 18 quantitative-trait locus influencing dyslexia. *Nature Genetics, 30*, 86-91.
- Fisher, S. E., Marlow, A. J., Lamb, J., Maestrini, E., Williams, D. F., Richardson, A. J., et al. (1999). A quantitative-trait locus on chromosome 6p influences different aspects of developmental dyslexia. *American Journal of Human Genetics, 64*, 146-156.
- Fletcher, H. (1929). *Speech and Hearing*. Princeton, NJ: Von Nostrand Reinhold.
- Flynn, J. M., & Rahbar, M. H. (1994). Prevalence of reading failure in boys compared with girls. *Psychology in the Schools, 31*, 66-71.
- Forrest, K., & Morrisette, M. L. (1999). Feature analysis of segmental errors in children with phonological disorders. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 42*, 187-194.
- Forster, K. I. (1976). Accessing the mental lexicon. In R. J. Wales & E. C. T. Walker (Eds.), *New approaches to language mechanisms* (pp. 257-287). North-Holland, Amsterdam.
- Foulke, E. (1971). The perception of time compressed speech. In D. L. Horton & J. J. Jenkins (Eds.), *The perception of language* (pp. 79-107). Columbus, OH: Merrill.
- Foulke, E., & Sticht, T. G. (1969). Review of research on the intelligibility and comprehension of accelerated speech. *Psychological Bulletin, 72*, 50-62.
- Fowler, C. A. (1986). An event approach to the study of speech perception from a direct-realist perspective. *Journal of Phonetics, 14*, 3-28.
- Fowler, C. A. (1996). Listeners do hear sounds, not tongues. *The Journal of the Acoustical Society of America, 99*, 1730-1741.

- Frauenfelder, U. H., & Tyler, L. K. (1987). The process of spoken word recognition: An introduction. *Cognition*, 25, 1-20.
- French, N. R., & Steinberg, J. C. (1947). Factors governing the intelligibility of speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 19, 90-119.
- Frith, U. (1985). Beneath the surface of developmental dyslexia. In K. E. Patterson, J. C. Marshall & M. Coltheart (Eds.), *Surface dyslexia: Cognitive and neuropsychological studies of phonological reading* (pp. 301-330). London: Erlbaum.
- Frith, U. (1999). Paradoxes in the definition of dyslexia. *Dyslexia*, 5, 192-214.
- Froehlich, P., Collet, L., Valatx, J. L., & Morgon, A. (1993). Sleep and active cochlear micromechanical properties in human subjects. *Hearing Research*, 66, 1-7.
- Frost, R. (1998). Toward a strong phonological theory of visual word recognition: True issues and false trails. *Psychological Bulletin*, 123, 71-99.
- Galaburda, A. M. (1993). Neurology of developmental dyslexia. *Current Opinion in Neurobiology*, 3, 237-242.
- Galaburda, A. M., & Kemper, T. L. (1979). Cytoarchitectonic abnormalities in developmental dyslexia: A case study. *Annals of Neurology*, 6, 94-100.
- Galaburda, A. M., & Livingstone, M. S. (1993). Evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 682, 70-82.
- Galaburda, A. M., Menard, M. T., & Rosen, G. D. (1994). Evidence for aberrant auditory anatomy in developmental dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91, 8010-8013.
- Galaburda, A. M., Sherman, G. F., Rosen, G. D., Aboitiz, F., & Geschwind, N. (1985). Developmental dyslexia: four consecutive patients with cortical anomalies. *Annals of Neurology*, 18, 222-233.
- Garvey, W. D. (1953). The intelligibility of speeded speech. *Journal of Experimental Psychology*, 45, 102-108.
- Gauthier, L., Dehaut, F., & Joanette, Y. (1989). The bells test: a quantitative and qualitative test for visual neglect. *The International journal of clinical neuropsychology*, 11, 49-54.
- Gay, T. (1978). Effect of speaking rate on vowel formant movements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63, 223-230.
- Gayán, J., Smith, S. D., Cherny, S. S., Cardon, L. R., Fulker, D. W., Brower, A. M., et al. (1999). Quantitative-trait locus for specific language and reading deficits on chromosome 6p. *American Journal of Human Genetics*, 64, 157-164.
- Gelfand, S. (2001). *Auditory System and Related Disorders. Essentials of Audiology* (Second Edition ed.). New York: Thieme.
- Geschwind, N. (1965). Disconnexion syndromes in animals and man. *Brain*, 88, 237-294.
- Geschwind, N. (1979). Specializations of the human brain. *Scientific American*, 241, 180-199.
- Geschwind, N., & Galaburda, A. M. (1985). Cerebral lateralization. Biological mechanisms, associations, and pathology: II. A hypothesis and a program for research. *Archives of Neurology*, 42, 521-552.
- Geschwind, N., & Levitsky, W. (1968). Human brain: Left-right asymmetries in temporal speech region. *Science*, 161, 186-187.
- Giard, M.-H., Collet, L., Bouchet, P., & Pernier, J. (1994). Auditory selective attention in the human cochlea. *Brain Research*, 633, 353-356.
- Giraud, A. L., Collet, L., Chéry-Croze, S., Magnan, J., & Chays, A. (1995). Evidence of a medial olivocochlear involvement in contralateral suppression of otoacoustic emissions in humans. *Brain Research*, 705, 15-23.

- Giraud, A. L., Garnier, S., Michey, C., Lina, G., Chays, A., & Chéry-Croze, S. (1997). Auditory efferents involved in speech-in-noise intelligibility. *NeuroReport*, 8, 1779-1783.
- Giraud, K., Démonet, J. F., Habib, M., Marquis, P., Chauvel, P., & Liégeois-Chauvel, C. (2005). Auditory evoked potential patterns to voiced and voiceless speech sounds in adult developmental dyslexics with persistent deficits. *Cerebral Cortex*, 15, 1524-1534.
- Glorig, A. (1958). A report of two normal hearing studies. *Annals Of Otology Rhinology And Laryngology*, 67, 93-111.
- Godfrey, J., Syrdal-Lasky, A., Millay, K., & Knox, C. (1981). Performance of dyslexic children on speech perception tests. *Journal of Experimental Child Psychology*, 32, 401-424.
- Gombert, J. E. (1990). *Le développement des capacités métalinguistiques*. Paris: P.U.F.
- Gombert, J. E., & Colé, P. (2000). Activités métalinguistiques, lecture et illettrisme. In M. Kail & M. Fayol (Eds.), *L'acquisition du langage: Le langage en développement au delà de 3 ans* (Vol. 2, pp. 117-150). Paris: PUF.
- Gottfried, T. L., Miller, J. L., & Payton, P. E. (1990). Effect of speaking rate on the perception of vowels. *Phonetica*, 47, 155-172.
- Gow Jr., D. W. (2001). Assimilation and anticipation in continuous spoken word recognition. *Journal of Memory and Language*, 45, 133-159.
- Gow Jr., D. W. (2003). Feature parsing: Feature cue mapping in spoken word recognition. *Perception & Psychophysics*, 65, 575-590.
- Grataloup, C. (2007). *La reconstruction cognitive de la parole dégradée : étude de l'intelligibilité comme indice d'une capacité cognitive humaine*. Université Lumière Lyon 2 & Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, France.
- Green, K. P., & Miller, J. L. (1985). On the role of visual rate information in phonetic perception. *Perception & psychophysics*, 38, 269-276.
- Greenberg, S. (1999). Speaking in shorthand - A syllable-centric perspective for understanding pronunciation variation. *Speech Communication*, 29, 159-176.
- Greenberg, S., & Arai, T. (1998). Speech intelligibility is highly tolerant of cross-channel spectral asynchrony. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103, 3057.
- Greisbach, R. (1992). Reading aloud at maximal speed. *Speech Communication*, 11, 469-473.
- Groff, J. A., & Liberman, M. C. (2003). Modulation of cochlear afferent response by the lateral olivocochlear system: Activation via electrical stimulation of the inferior colliculus. *Journal of Neurophysiology*, 90, 3178-3200.
- Guinan Jr., J. J. (1996). The physiology of olivocochlear efferents. In P. J. Dallos, A. N. Popper & R. R. Fay (Eds.), *The Cochlea* (pp. 435-502). New York: Springer-Verlag.
- Habib, M. (1997). *Dyslexie : le cerveau singulier*. Marseille: Solal.
- Habib, M. (2000). The neurological basis of developmental dyslexia: an overview and working hypothesis. *Brain*, 123, 2373-2399.
- Habib, M., Gayraud, D., Oliva, A., Regis, J., Salamon, G., & Khalil, R. (1991). Effects of handedness and sex on the morphology of the corpus callosum: a study with brain magnetic resonance imaging. *Brain and Cognition*, 16, 41-61.
- Hannula-Jouppi, K., Kaminen-Ahola, N., Taipale, M., Eklund, R., Nopola-Hemmi, J., Kääriäinen, H., et al. (2005). The axon guidance receptor gene ROBO1 is a candidate gene for developmental dyslexia. *PLoS Genetics*, 1, 467-674.
- Hardcastle, W. (1973). Some observations on the tense-lax distinction in initial stops in Korean. *Journal of Phonetics*, 1, 263-272.
- Hari, R., & Kiesilä, P. (1996). Deficit of temporal auditory processing in dyslexic adults. *Neuroscience Letters*, 205, 138-140.

- Hari, R., & Renvall, H. (2001). Impaired processing of rapid stimulus sequences in dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 5, 525-532.
- Hari, R., Sääskilahti, A., Helenius, P., & Uutela, K. (1999). Non-impaired auditory phase locking in dyslexic adults. *NeuroReport*, 10, 2347-2348.
- Hawkins, S. (2003). Roles and representations of systematic fine phonetic detail in speech understanding. *Journal of Phonetics*, 31, 373-405.
- Hayes, E., Warrier, C., Nicol, T., Zecker, S., & Kraus, N. (2003). Neural plasticity following auditory training in children with learning problems. *Clinical Neurophysiology*, 114, 673-684.
- Hazan, V., & Rosen, S. (1991). Individual variability in the perception of cues to place contrasts in initial stops. *Perception & Psychophysics*, 49, 187-200.
- Heath, S., Hogben, J., & Clark, C. (1999). Auditory temporal processing in disabled readers with and without oral language delay. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 40, 637-647.
- Hécaen, H., & Sauguet, J. (1971). Cerebral dominance in left-handed subjects. *Cortex*, 7, 19-48.
- Heilman, K. M., Voeller, K., & Alexander, A. W. (1996). Developmental dyslexia: a motor-articulatory feedback hypothesis. *Annales of Neurology*, 39, 407-412.
- Heim, S., Kissler, J., Elbert, T., & Rockstroh, B. (2004). Cerebral lateralization in schizophrenia and dyslexia: Neuromagnetic responses to auditory stimuli. *Neuropsychologia*, 42, 692-697.
- Helenius, P., Uutela, K., & Hari, R. (1999). Auditory stream segregation in dyslexic adults. *Brain*, 122, 907-913.
- Herman, A. E., Galaburda, A. M., Fitch, R. H., Carter, A. R., & Rosen, G. D. (1997). Cerebral microgyria, thalamic cell size and auditory temporal processing in male and female rats. *Cerebral Cortex*, 7, 453-464.
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2000). Towards a functional neuroanatomy of speech perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 131-138.
- Hienz, R., Stiles, P., & May, B. (1998). Effects of bilateral olivocochlear lesions on vowel formant discrimination in cats. *Hearing Research*, 116, 10-20.
- Hill, N. I., Bailey, P. J., Griffiths, Y. M., & Snowling, M. J. (1999). Frequency acuity and binaural masking release in dyslexic listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106, L53-L58.
- Hoefl, F., Meyler, A., Hernandez, A., Juel, C., Taylor-Hill, H., Martindale, J., et al. (2007). Functional and morphometric brain dissociation between dyslexia and reading ability. *Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america*, 104, 4234-4239.
- Houtgast, T., & Steeneken, H. J. M. (1985). A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77, 1069-1077.
- Huffman, R., & Henson, O. (1990). The descending auditory pathway and acousticomotor systems: connections with the inferior colliculus. *Brain Research Reviews*, 15, 295-323.
- Hugdahl, K., Synnevag, B., & Satz, P. (1990). Immune and autoimmune diseases in dyslexic children. *Neuropsychologia*, 28, 673-679.
- Humphreys, P., Kaufmann, W. E., & Galaburda, A. M. (1990). Developmental dyslexia in women: Neuropathological findings in three patients. *Annals of Neurology*, 28, 727-738.
- Hynd, G. W., Hall, J., Novey, E. S., Eliopoulos, D., Black, K., Gonzales, J. J., et al. (1995). Dyslexia and corpus callosum morphology. *Archives of Neurology*, 52, 32-38.

- Jacquier-Roux, M., Valdois, S., & Zorman, M. (2002). *ODEDYS: un outil de dépistage des dyslexies Version 1*. Grenoble: Laboratoire cogni-sciences, IUFM de Grenoble.
- Jacquier-Roux, M., Valdois, S., Zorman, M., Lequette, C., & Pouget, G. (2005). *ODEDYS: un outil de dépistage des dyslexies Version 2*. Grenoble: Laboratoire cogni-sciences, IUFM de Grenoble.
- Jakobson, R., Fant, G., & Halle, M. (1952). *Preliminaries to speech analysis: the distinctive features and their correlates*. Cambridge: MIT Press.
- Janse, E. (2003). *Production and perception of fast speech*. Universiteit Utrecht, Utrecht, The Netherlands.
- Jerger, S., Martin, R., & Jerger, J. (1987). Specific auditory perceptual dysfunction in a learning disabled child. *Ear and Hearing*, 8, 78-86.
- Joanisse, M. F., Manis, F. R., Keating, P., & Seidenberg, M. S. (2000). Language deficits in dyslexic children: Speech perception, phonology and morphology. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77, 30-60.
- Johnson, K. (1997). *Acoustic and Auditory Phonetics*. Oxford: Blackwell.
- Johnson, K. L. (2005). Speaker normalization in speech perception. In D. Pisoni & R. Remez (Eds.), *The Handbook of Speech Perception* (pp. 363-389). Malden, MA: Blackwell.
- Johnsrude, I. S., Zatorre, R. J., Milner, B. A., & Evans, A. C. (1997). Left-hemisphere specialization for the processing of acoustic transients. *NeuroReport*, 8, 1761-1765.
- Josse, G., Hervé, P.-Y., Crivello, F., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2006). Hemispheric specialization for language: Brain volume matters. *Brain Research*, 1068, 184-193.
- Josse, G., & Tzourio-Mazoyer, N. (2004). Hemispheric specialization for language. *Brain Research Reviews*, 44, 1-12.
- Jun, J. (1995). *Perceptual and Articulatory Factors in Place Assimilation: An Optimality Theoretic Approach*. UCLA.
- Jusczyk, P. W. (1999). How infants begin to extract words from speech. *Trends in Cognitive Sciences*, 3, 323-328.
- Jusczyk, P. W., & Luce, P. A. (2002). Speech perception and spoken word recognition: Past and present. *Ear and Hearing*, 23, 2-40.
- Jusczyk, P. W., Luce, P. A., & Charles-Luce, J. (1994). Infants' sensitivity to phonotactic patterns in the native language. *Journal of Memory and Language*, 33, 630-645.
- Kakigi, A., Hirakawa, H., Mount, R. J., & Harrison, R. V. (1997). The effects of crossed olivocochlear bundle section on transient evoked otoacoustic emissions. *Hearing Research*, 110, 34-38.
- Kawase, T., Delgutte, B., & Liberman, M. C. (1993). Antimasking effects of the olivocochlear reflex. II. Enhancement of auditory-nerve response to masked tones. *Journal of Neurophysiology*, 70, 2533-2549.
- Kawase, T., & Liberman, M. C. (1993). Antimasking effects of the olivocochlear reflex. I. Enhancement of compound action potentials to masked tones. *Journal of Neurophysiology*, 70, 2519-2532.
- Keller, E., & Zellner, B. (1996). A timing model for fast French. In *York Papers in Linguistics* (Vol. 17, pp. 53-75): University of York.
- Kemp, D. (1978). Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system. *Journal of Acoustical Society of America*, 64, 1386-1391.
- Kemp, D. (1979). Evidence of mechanical nonlinearity and frequency selective wave amplification in the cochlea. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 224, 37-45.
- Kemp, D. (2002). Otoacoustic emissions, their origin in cochlear function, and use. *British Medical Bulletin*, 63, 223-241.

- Kent, R. D., & Moll, K. L. (1969). Vocal-tract characteristics of the stop cognates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 46, 1549-1555.
- Kessinger, R. H., & Blumstein, S. E. (1998). Effects of speaking rate on voice-onset time and vowel production: Some implications for perception studies. *Journal of Phonetics*, 26, 117-128.
- Kewley-Port, D. (1983). Time-varying features as correlates of place of articulation in stop consonants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 73, 322-335.
- Khalifa, S. (1999). *Caractérisation des asymétries fonctionnelles de l'appareil auditif périphérique chez l'humain : relations avec la spécialisation hémisphérique ?* Unpublished Thèse de Doctorat en Neuropsychologie, Université CLaude Bernard - Lyon 1, Lyon.
- Khalifa, S., Bougeard, R., Morand, N., Veuillet, E., Isnard, J., Guenot, M., et al. (2001). Evidence of peripheral auditory activity modulation by the auditory cortex in humans. *Neuroscience*, 104, 347-358.
- Khalifa, S., Bruneau, N., Rogé, B., Georgieff, N., Veuillet, E., Adrien, J.-L., et al. (2001). Peripheral auditory asymmetry in infantile autism *European Journal of Neuroscience*, 13, 628-632.
- Khalifa, S., & Collet, L. (1996). Functional asymmetry of medial olivocochlear system in humans. Towards a peripheral auditory lateralization. *NeuroReport*, 7, 993-996.
- Khalifa, S., Micheyl, C., Pham, E., Maison, S., Veuillet, E., & Collet, L. (2000). Tones disappear faster in the right ear than in the left. *Perception & Psychophysics*, 62, 647-655.
- Khalifa, S., Micheyl, C., Veuillet, E., & Collet, L. (1998). Peripheral auditory lateralization assessment using TEOAEs. *Hearing Research*, 121, 29-34.
- Khalifa, S., Morlet, T., Micheyl, C., Morgon, A., & Collet, L. (1997). Evidence of peripheral hearing asymmetry in humans: clinical implications. *Acta Otolaryngologica*, 117, 192-196.
- Khalifa, S., Veuillet, E., & Collet, L. (1998). Influence of handedness on peripheral auditory asymmetry. *European Journal of Neuroscience*, 10, 2731-2737.
- Kidd, G. R. (1989). Articulatory-rate context effects in phoneme identification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 736-748.
- King, C., Warrier, C. M., Hayes, E., & Kraus, N. (2002). Deficits in auditory brainstem pathway encoding of speech sounds in children with learning problems. *Neuroscience Letters*, 319, 111-115.
- Klingberg, T., Hedehus, M., Temple, E., Salz, T., Gabrieli, J., Moseley, M., et al. (2000). Microstructure of temporo-parietal white matter as a basis for reading ability: evidence from diffusion tensor magnetic resonance imaging. *Neuron*, 25, 493-500.
- Kraus, N. (2001). Auditory pathway encoding and neural plasticity in children with learning problems. *Audiology and Neuro-Otology*, 6, 221-227.
- Kraus, N., McGee, T. J., Carrell, T. D., Zecker, S. G., Nicol, T. G., & Koch, D. B. (1996). Auditory neurophysiologic responses and discrimination deficits in children with learning problems. *Science*, 273, 971-973.
- Krifi, S., Bedoin, N., & Mérigot, A. (2003). Effects of voicing similarity between consonants in printed stimuli, in normal and dyslexic children. *Current Psychology Letters: Behaviour, Brain & Cognition*, 10, 1-7.
- Krull, D. (1990). Relating acoustic properties to perceptual responses: A study of Swedish voiced stops. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 88, 2557-2570.
- Kuhl, P. K. (1991). Human adults and human infants show a "perceptual magnet effect" for the prototypes of speech categories, monkeys do not. *Perception & Psychophysics*, 50, 93-107.

- Kujala, T., Myllyviita, K., Tervaniemi, M., Alho, K., Kallio, J., & Näätänen, R. (2000). Basic auditory dysfunction in dyslexia as demonstrated by brain activity measurements. *Psychophysiology*, *37*, 262–266.
- Kujala, T., & Näätänen, R. (2001). The mismatch negativity in evaluating central auditory dysfunction in dyslexia. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *25*, 535-543.
- Kumar, U., & Vanaja, C. (2004). Functioning of olivocochlear bundle and speech perception in noise. *Ear and Hearing*, *25*, 142-146.
- Ladefoged, P. (2001). *Vowels and consonants: an introduction to the sounds of languages*. Oxford: Blackwell.
- Ladefoged, P., & Broadbent, D. E. (1957). Information Conveyed by Vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *29*, 98-104.
- Lahiri, A., & Blumstein, S. E. (1981). A reconsideration of acoustic invariance for place of articulation in stop consonants: Evidence from cross-language studies. *The Journal of the Acoustical Society of America Supplement 1*(70), S39.
- Lahiri, A., & Reetz, H. (2002). Underspecified recognition. In C. Gussenhoven & N. Warner (Eds.), *Papers in Laboratory Phonology VII* (pp. 637-675). Berlin, Germany: Mouton de Gruyter.
- Lalain, M., Demolin, D., Habib, M., Nguyen, N., & Teston, B. (2000). *Particularités articulatoires de la dyslexie développementale phonologique*. Paper presented at the XXIIIèmes Journées d'Etude de la Parole, Aussois.
- Landercy, A., & Renard, R. (1977). *Éléments de phonétique*. Bruxelles: Didier.
- Lass, N. J. (1970). The significance of intra- and intersentence pause times in perceptual judgments of oral reading rate. *Journal of Speech and Hearing Research*, *13*, 777-784.
- Lecocq, P. (1991). *Apprentissage de la lecture et dyslexie*. Bruxelles: Mardaga.
- Lecocq, P. (1993). Entraînement à l'analyse segmentale et apprentissage de la lecture. *International Journal of Psychology*, *28*, 549-569.
- Lefavrais, P. (1967). *Le test de l'Alouette*. Paris: Edition du Centre de Psychologie Appliquée.
- Lefèvre, F. (1985). *Une méthode d'analyse auditive des confusions phonétiques : la confrontation indiciaire*. Université de Franche-Comté.
- Lefly, D., & Pennington, B. (1991). Spelling errors and reading fluency in compensated adult dyslexics. *Annals of Dyslexia*, *41*, 143-162.
- Lehiste, I. (1970). *Suprasegmentals*. Cambridge: MIT Press.
- Lehiste, I., & Peterson, G. (1961). Transitions, glides, and diphthongs. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *33*, 268-277.
- Leonard, C. M., Eckert, M. A., Lombardino, L. J., Oakland, T., Kranzler, J., Mohr, C. M., et al. (2001). Anatomical risk factors for phonological dyslexia. *Cerebral Cortex*, *11*, 148-157.
- Leonard, L. B. (1998). *Children with specific language impairment*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Liberman, A. M., Cooper, F. S., Shankweiler, D. P., & Studdert-Kennedy, M. (1967). Perception of the speech code. *Psychological Review*, *74*, 431-461.
- Liberman, A. M., Harris, K. S., Hoffman, H. S., & Griffith, B. C. (1957). The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of Experimental Psychology*, *54*, 358-368.
- Liberman, A. M., Ingemann, F., Lisker, L., Delattre, P. C., & Cooper, F. S. (1959). Minimal rules for synthesizing speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *31*, 1490-1499.
- Liberman, A. M., & Mattingly, I. G. (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, *21*, 1-36.

- Liberman, A. M., & Whalen, D. H. (2000). On the relation of speech to language. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 187-196.
- Liberman, I. Y. (1973). Segmentation of the spoken word and reading acquisition. *Bulletin of the Orton Society*, 23, 65-77.
- Licklider, J. C. R. (1946). Effects of amplitude distortion upon the intelligibility of speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 18, 429-434.
- Licklider, J. C. R. (1950). The intelligibility of amplitude-dichotomized, time-quantized speech waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 22, 820-823.
- Liénard, J. S. (1972). *Analyse, synthèse et reconnaissance de la parole*. Université Paris VII, Paris.
- Lindblom, B. (1963). Spectrography study of vowel reduction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 35, 1773-1781.
- Lindblom, B. (1990). Explaining phonetic variation: a sketch of the H&H theory. In W. J. Hardcastle & A. Marchal (Eds.), *Speech production and speech modelling*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Lindblom, B. E. F., & Studdert-Kennedy, M. (1967). On the role of formant transitions in vowel recognition. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 42, 830-843.
- Lisker, L. (1986). "Voicing" in English: A catalogue of acoustic features signaling /b/ versus /p/ in trochees. *Language and Speech*, 29, 3-11.
- Lisker, L., & Abramson, A. S. (1964). A cross-linguistic study of voicing in initial stops: Acoustical measurements. *Word*, 20, 384-422.
- Lisker, L., & Abramson, A. S. (1967). Some effects of context on voice onset time in English stops. *Language and Speech*, 10, 1-28.
- Livingstone, M. S., Rosen, G. D., Drislane, F. W., & Galaburda, A. M. (1991). Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america*, 88, 7943-7947.
- Lorenzi, C. (1999). Effets de lésions périphériques et centrales sur l'acuité temporelle auditive. *Les Cahiers de l'Audition*, 12, 17-30.
- Lovegrove, W. J., Bowling, A., Badcock, D., & Blackwood, M. (1980). Specific reading disability: differences in contrast sensitivity as a function of spatial frequency. *Science*, 210, 439-440.
- Lovegrove, W. J., Garzia, R., & Nicholson, S. (1990). Experimental evidence for a transient system deficit in specific reading disability. *Journal of the American Optometric Association*, 2, 137-146.
- Lovegrove, W. J., Martin, F., & Slaghuis, W. (1986). A theoretical and experimental case for a visual deficit in specific reading disability. *Cognitive Neuropsychology*, 3, 225-267.
- Lundberg, I., Frost, J., & Petersen, O. (1988). Effects of an Extensive Program for Stimulating Phonological Awareness in Preschool Children. *Reading Research Quarterly*, 23, 263-284.
- Lyon, R. F. (1982). *A Computational Model of Filtering, Detection, and Compression in the Cochlea*. Paper presented at the IEEE-ICASSP-82.
- Magnan, A., Ecalle, J., & Veuillet, E. (2005). Habiletés phonologiques, identification de mots écrits et déficits auditifs perceptifs chez les enfants dyslexiques : effet d'un entraînement audio-visuel. *Revue française de pédagogie*, 152, 29-39.
- Maison, S., Durrant, J., Gallineau, C., Micheyl, C., & Collet, L. (2001). Delay and temporal integration in medial olivocochlear bundle activation in humans. *Ear and Hearing*, 22, 65-74.
- Maison, S., Micheyl, C., & Collet, L. (1997). Medial olivocochlear efferent system in humans studied with amplitude-modulated tones. *Journal of Neurophysiology*, 77, 1759-1768.

- Manis, F., McBride-Chang, C., Seidenberg, M., Keating, P., Doi, L., Munson, B., et al. (1997). Are Speech Perception Deficits Associated with Developmental Dyslexia? *Journal of Experimental Child Psychology*, *66*, 211-235.
- Manis, F., Seidenberg, M., Doi, L., McBride-Chang, C., & Petersen, A. (1996). On the bases of two subtypes of developmental dyslexia. *Cognition*, *58*, 157-195.
- Marino, C., Giorda, R., Lorusso, M., Vanzin, L., Salandi, N., Nobile, M., et al. (2005). A family-based association study does not support DYX1C1 on 15q21.3 as a candidate gene in developmental dyslexia. *European Journal of Human Genetics*, *13*, 491-499.
- Marslen-Wilson, W. D. (1984). Function and process in spoken word-recognition. In H. Bouma & D. G. Bouwhuis (Eds.), *Attention and Performance, X*. London: LEA.
- Marslen-Wilson, W. D. (1987). Functional parallelism in spoken word recognition. *Cognition*, *71*, 71-102.
- Marslen-Wilson, W. D., & Tyler, L. K. (1980). The temporal structure of spoken language understanding. *Cognition*, *8*, 1-71.
- Marslen-Wilson, W. D., & Welsh, A. (1978). Processing interactions and lexical access during word recognition in continuous speech. *Cognitive Psychology*, *10*, 29-63.
- Marslen-Wilson, W. D., & Zwitserlood, P. (1989). Accessing spoken words: The importance of word onsets. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *15*, 576-585.
- Martin, F., & Lovegrove, W. J. (1987). Flicker contrast sensitivity in normal and specifically disabled readers. *Perception*, *16*, 215-221.
- Martin, J. G., & Bunnell, H. T. (1981). Perception of anticipatory coarticulation effects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *69*, 559-567.
- Massaro, D. W. (1975). Perceptual images, processing time, and perceptual units in speech perception. In D. W. Massaro (Ed.), *Understanding Language: An Information-Processing Analysis of Speech Perception, Reading, and Psycholinguistics*. New-York: Academic.
- Max, L., & Caruso, A. (1997). Acoustic measures of temporal intervals across speaking rates: variability of syllable- and phrase-level relative timing. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *40*, 1097-1110.
- May, B., & McQuone, S. (1995). Effects of bilateral olivocochlear lesions on pure-tone intensity discrimination in cats. *Audit. Neurosci.*, *1*, 385-400.
- McAnally, K. I., & Stein, J. F. (1996). Auditory temporal coding in dyslexia. *Proceedings: Biological Sciences*, *263*, 961-965.
- McClelland, J. L., & Elman, J. L. (1986). The TRACE model of speech perception. *Cognitive Psychology*, *18*, 1-86.
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: Part 1. An account of basic finding. *Psychological Review*, *88*, 375-407.
- McDougall, S., & Ellis, A. W. (1994). On the problems of comparing dyslexics with other groups of readers (and the quest for the cognitive basis of dyslexia). *Early Childhood Development and Care*, *101*, 33-49.
- Mehler, J., Dommergues, J. Y., Frauenfelder, U. H., & Segui, J. (1981). The syllable's role in speech segmentation. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *20*, 298-305.
- Meng, H., Hager, K., Held, M., Page, G., Olson, R., Pennington, B., et al. (2005). TDT-association analysis of EKN1 and dyslexia in a Colorado twin cohort. *Human Genetics*, *118*, 87-90.
- Meng, H., Smith, S., Hager, K., Held, M., Liu, J., Olson, R., et al. (2005). DCDC2 is associated with reading disability and modulates neuronal development in the brain.

- Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america*, 102, 17053–17058.
- Merigan, W., & Maunsell, H. (1993). How parallel are the primate visual pathways? *Annual Review of Neuroscience*, 16, 369-402.
- Merzenich, M. M., Jenkins, W. M., Johnston, P., Schreiner, C., Miller, S. L., & Tallal, P. (1996). Temporal processing deficits of language-learning impaired children ameliorated by training. *Science*, 271, 77-81.
- Meunier, F., Cenier, T., Barkat, M., & Magrin-Chagnolleau, I. (2002). *Mesure d'intelligibilité de segments de parole à l'envers en français*. Paper presented at the Journées d'Etude de la Parole, Nancy, France.
- Micheyl, C., & Collet, L. (1996). Involvement of the olivocochlear bundle in the detection of tones in noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 99, 1604-1610.
- Micheyl, C., Khalfa, S., Perrot, X., & Collet, L. (1997). Difference in cochlear efferent activity between musicians and non-musicians. *NeuroReport*, 8, 1047-1050.
- Micheyl, C., Morlet, T., Giraud, A. L., Collet, L., & Morgon, A. (1995). Contralateral suppression of evoked otoacoustic emissions and detection of a multi-tone complex in noise. *Acta Otolaryngologica*, 115, 178-182.
- Micheyl, C., Perrot, X., & Collet, L. (1997). Relationship between auditory intensity discrimination in noise and olivocochlear efferent system activity in humans. *Behavioural Neuroscience*, 111, 801-807.
- Miles, T. R. (1993). *Dyslexia: the Pattern of Difficulties*. London: Whurr.
- Miles, T. R., Haslum, M. N., & Wheeler, T. J. (1998). Gender ratio in dyslexia. *Annals of Dyslexia*, 48, 27-55.
- Miller, G. A., Heise, G. A., & Lichten, W. (1951). The intelligibility of speech as a function of the context of the test materials. *Journal of Experimental Psychology*, 41, 329-335.
- Miller, G. A., & Licklider, J. C. R. (1950). The intelligibility of interrupted speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 22, 167-173.
- Miller, G. A., & Nicely, P. E. (1955). An analysis of perceptual confusions among some English consonants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 27, 338-352.
- Miller, J. L. (2001). Mapping from acoustic signal to phonetic category: internal category structure, context effects and speeded categorisation. *Language and Cognitive Processes*, 16, 683-690.
- Miller, J. L., Connine, C. M., Schermer, T. M., & Kluender, K. R. (1983). A possible auditory basis for internal structure of phonetic categories. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 73, 2124-2133.
- Miller, J. L., & Eimas, P. D. (1995). Speech perception: From signal to word. *Annual Review of Psychology* 46, 467-492.
- Miller, J. L., Green, K. P., & Reeves, A. (1986). Speaking rate and segments : A look at the relation between speech production and speech perception for the voicing contrast. *Phonetica*, 43, 106-115.
- Miller, J. L., Grosjean, F., & Lomanto, C. (1984). Articulation rate and its variability in spontaneous speech: A reanalysis and some implications. *Phonetica*, 41, 215-225.
- Miller, J. L., & Liberman, A. M. (1979). Some effects of later-occurring information on the perception of stop consonant and semivowel. *Perception and Psychophysics*, 25, 457-465.
- Miller, J. L., O'Rourke, T. B., & Volaitis, L. E. (1997). Internal structure of phonetic categories: effects of speaking rate. *Phonetica*, 54, 121-137.
- Miller, J. L., & Volaitis, L. E. (1989). Effect of speaking rate on the perceptual structure of a phonetic category. *Perception & Psychophysics*, 46, 505-512.

- Mody, M. (1993). *Bases of reading impairment in speech perception: A deficit in rate of auditory processing or in phonological coding?* Unpublished Speech and Hearing Sciences, University of New York.
- Mody, M., Studdert-Kennedy, M., & Brady, S. (1997). Speech perception deficits in poor readers: Auditory processing or phonological coding? *Journal of Experimental Child Psychology*, *64*, 199-231.
- Moore, B. C. J. (2003). *An introduction to the psychology of hearing (5th ed)*. San Diego: Academic Press.
- Moore, J., Simmons, D., & Guan, Y. (1999). The human olivocochlear system: organization and development. *Audiology and Neuro-Otology*, *4*, 311-325.
- Morgan, W. P. (1896). A case of congenital word blindness. *British Medical Journal*, *2*, 1378.
- Morlet, T., Goforth, L., Hood, L., Ferber, C., Duclaux, R., & Berlin, C. (1999). Development of human cochlear active mechanism asymmetry: involvement of the medial olivocochlear system? *Hearing Research*, *134*, 153-162.
- Morris, D. W., Robinson, L., Turic, D., Duke, M., Webb, V., Milham, C., et al. (2000). Family-based association mapping provides evidence for a gene for reading disability on chromosome 15q. *Human Molecular Genetics*, *9*, 843-848.
- Morton, J. (1969). Interaction of information in word recognition. *Psychological Review*, *76*, 165-178.
- Moulin, A., Collet, L., Veuillet, E., & Morgon, A. (1993). Interrelations between transiently evoked otoacoustic emissions, spontaneous otoacoustic emissions and acoustic distortion products in normally hearing subjects. *Hearing Research*, *65*, 216-233.
- Muchnik, C., Rotha, D. A.-E., Othman-Jebara, R., Putter-Katz, H., Shabtai, E. L., & Hildesheimer, M. (2004). Reduced medial olivocochlear bundle system function in children with auditory processing disorders. *Audiology and Neuro-Otology*, *9*, 107-114.
- Näätänen, R. (2001). The perception of speech sounds by the human brain as reflected by the mismatch negativity (MMN) and its magnetic equivalent (MMNm). *Psychophysiology*, *38*, 1-21.
- Näätänen, R., Lehtokoski, A., Lennes, M., Cheour, M., Huotilainen, M., Livonen, A., et al. (1997). Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature*, *385*, 432-434.
- Nagarajan, S. S., Mahncke, H., Salz, T., Tallal, P., Roberts, T., & Merzenich, M. M. (1999). Cortical auditory signal processing in poor readers. *Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america*, *96*, 6483-6488.
- Newcombe, F., & Ratcliff, G. (1973). Handedness, speech lateralization and ability. *Neuropsychologia*, *11*, 399-407.
- Nguyen, N., Wauquier-Gravelines, S., & Tuller, B. (à paraître). The dynamical approach to speech perception: From fine phonetic detail to abstract phonological categories, (eds.), Mouton [in press]. In I. Chitoran, C. Coupé, E. Marsico & F. Pellegrino (Eds.), *Approaches to Phonological Complexity*. Berlin: Mouton de Gruyter.
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (1990). Automaticity: a new framework for dyslexia research? *Cognition*, *35*, 159-182.
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., Berry, E. L., Jenkins, I. H., Dean, P., & Brooks, D. J. (1999). Association of abnormal cerebellar activation with motor learning difficulties in dyslexic adults. *The Lancet*, *353*, 1662-1667.
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., & Dean, P. (2001). Developmental dyslexia: the cerebellar deficit hypothesis. *Trends in Neurosciences*, *24*, 508-511.

- Niogi, S., & McCandliss, B. (2006). Left lateralized white matter microstructure accounts for individual differences in reading ability and disability. *Neuropsychologia*, *44*, 2178-2188.
- Nittrouer, S. (1992). Age-related differences in perceptual effects of formant transitions within syllables and across syllable boundaries. *Journal of Phonetics*, *20*, 351-382.
- Nittrouer, S. (1999). Do temporal processing deficits cause phonological processing problems? *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *42*, 925-942.
- Niyogi, P., & Ramesh, P. (2003). The voicing feature for stop consonants: Recognition experiments with continuously spoken alphabets. *Speech Communication*, *41*, 349-367.
- Nooteboom, S. G. (1979). Perceptual adjustment to speech rate: a case of backward perceptual normalisation. In *Anniversaries in Phonetics: Studia gratulatoria dedicated to Hendrik Mol* (pp. 255-269). Amsterdam: Institute of Phonetic Sciences.
- Nooteboom, S. G. (1981). Speech rate and segmental perception or the role of words in phoneme identification. In T. Myers, J. Laver & J. Anderson (Eds.), *The cognitive representation of speech* (pp. 143-150). North Holland.
- Nopola-Hemmi, J., Myllyluoma, B., Haltia, T., Taipale, M., Ollikainen, V., Ahonen, T., et al. (2001). A dominant gene for developmental dyslexia on chromosome 3. *Journal of Medical Genetics*, *38*, 658-664.
- Norris, D. (1994). Shortlist: A connectionist model of continuous speech recognition. *Cognition*, *52*, 189-234.
- Ohala, J. J. (1983). The origin of sound patterns in vocal tract constraints. In P. F. MacNeilage (Ed.), *The production of speech* (pp. 189-216). New York: Springer.
- Ohala, J. J. (1990). The phonetics and phonology of aspects of assimilation. In J. Kingston & M. E. Beckman (Eds.), *Papers in laboratory phonology I: between the grammar and physics of speech* (pp. 258-275). New York: Cambridge University Press.
- Ohala, J. J. (1996). Speech perception is hearing sounds, not tongues. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *99*, 1718-1725.
- Ohde, R. N. (1979). *Acoustic characteristics of stops in CV syllables*. Paper presented at the convention of the American Speech-Language-Hearing Association, Atlanta, Georgia.
- Ohde, R. N., & Stevens, K. N. (1983). Effect of burst amplitude on the perception of stop consonant place of articulation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *74*, 706-714.
- Öhman, S. E. G. (1966). Coarticulation in VCV utterances: Spectrographic measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *39*, 151-168.
- Oldfield, R. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, *9*, 97-113.
- Orton, S. T. (1925). Word-blindness in school children. *Archives of Neurology and Psychiatry*, *14*, 582-615.
- Orton, S. T. (1937). *Reading, Writing and Speech problems in children*. New-York: Norton.
- Pallier, C., Sebastián-Gallés, N., Dupoux, E., Christophe, A., & Mehler, J. (1998). Perceptual adjustment to time-compressed speech: A cross-linguistic study. *Memory & Cognition*, *26*, 844-851.
- Paracchini, S., Thomas, A., Castro, S., Lai, C., Paramasivam, M., Wang, Y., et al. (2006). The chromosome 6p22 haplotype associated with dyslexia reduces the expression of KIAA0319, a novel gene involved in neuronal migration. *Human Molecular Genetics*, *15*, 1659-1666.
- Paulesu, E., Demonet, J. F., Fazio, F., McCrory, E., Chanoine, V., N., B., et al. (2001). Dyslexia: cultural diversity and biological unity. *Science*, *291*, 2165-2167.

- Paulesu, E., Frith, U., Snowling, M., Gallagher, A., Morton, J., Frackowiak, R. S. J., et al. (1996). Is developmental dyslexia a disconnection syndrome? Evidence from PET scanning. *Brain*, *119*, 143–157.
- Penner, M., & Zhang, T. (1997). Prevalence of spontaneous otoacoustic emissions in adults revisited. *Hearing Research*, *103*, 28-34.
- Pennington, B., & Gilger, J. (1996). How is dyslexia transmitted? In C. Chase, G. Rosen & G. Sherman (Eds.), *Developmental dyslexia: neural, cognitive, and genetic mechanisms* (pp. 41-61). Baltimore: York Press.
- Pennington, B., van Orden, G., Smith, S., Green, P., & Haith, M. (1990). Phonological Processing Skills and Deficits in Adult Dyslexics. *Child Development*, *61*, 1753-1778.
- Perkell, J., & Klatt, D. (1986). *Invariance and variability in speech processes*: Lawrence Erlbaum Associates.
- Perrot, X. (2003). *Cortex auditif et système efférent olivocochléaire médian : influence d'une stimulation électrique corticale sur les otoémissions acoustiques et leur atténuation controlatérale*. Unpublished Thèse de Doctorat en Médecine, Faculté de Médecine Lyon - Nord, Université Claude Bernard - Lyon 1, Lyon.
- Perrot, X., Micheyl, C., Khalfa, S., & Collet, L. (1999). Stronger bilateral efferent influences on cochlear biomechanical activity in musicians than in non-musicians. *Neuroscience Letters*, *262*, 167-170.
- Perrot, X., Ryvlin, P., Isnard, J., Guénot, M., Catenoix, H., Fischer, C., et al. (2006). Evidence of corticofugal modulation of peripheral auditory activity in humans. *Cerebral Cortex*, *16*, 941-948.
- Peterson, G., & Lehiste, I. (1960). Duration of syllable nuclei in english. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *32*, 693-703.
- Pickett, J. (1999). *The Acoustics of Speech Communication: Fundamentals, Speech Perception Theory, and Thechnology*. Boston: Allyn and Bacon.
- Pols, L. C. W. (1983). Three-mode principal component analysis of confusion matrices, based on the identification of Dutch consonants, under various conditions of noise and reverberation. *Speech Communication*, *2*, 275-293.
- Port, R. F. (1981). Linguistic timing factors in combination. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *69*, 262-274.
- Posner, M. (1995). Attention in cognitive neuroscience: an overview In M. Gazzaniga (Ed.), *The cognitive Neurosciences*. Cambridge: Bradford books MIT Press.
- Price, C. J. (2000). The anatomy of language: Contributions from functional neuroimaging. *Journal of Anatomy*, *197*, 335-359.
- Raaijmakers, J. G. W. (2003). A further look at the “language-as-fixed-effect fallacy”. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, *57*, 141-151.
- Rack, J. (1994). Dyslexia: the phonological deficit hypothesis. In A. J. Fawcett & R. I. Nicolson (Eds.), *Dyslexia in Children: multi-disciplinary perspectives* (pp. 5-37). New-York: Harvester Wheatsheaf.
- Rack, J. (1997). Issues in the assessment of developmental dyslexia in adults: theoretical and applied perspectives. *Journal of Research in Reading*, *20*, 66-76.
- Rack, J., Snowling, M. S., & Olson, R. K. (1992). The non-word reading deficit in developmental dyslexia: A review. *Reading Research Quarterly*, *27*, 28-53.
- Rajan, R. (2000). Centrifugal Pathways Protect Hearing Sensitivity at the Cochlea in Noisy Environments That Exacerbate the Damage Induced by Loud Sound. *The Journal of Neuroscience*, *20*, 6684-6693.
- Ramus, F. (2003). Developmental dyslexia: specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction? *Current Opinion in Neurobiology*, *13*, 212–218.

- Ramus, F. (2006). A neurological model of dyslexia and other domain-specific developmental disorders with an associated sensorimotor syndrome. In G. D. Rosen (Ed.), *The dyslexic brain: New pathways in neuroscience discovery* (pp. 75-101). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Ramus, F., Rosen, S., Dakin, S., Day, B., Castellote, J., White, S., et al. (2003). Theories of developmental dyslexia: insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain*, *126*, 841-865.
- Raven, J. C. (1938). *Progressive matrices: A perceptual test of intelligence*. London: H.K. Lewis.
- Reed, M. (1989). Speech perception and the discrimination of brief auditory cues in reading disabled children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *48*, 270-292.
- Remez, R. E., Rubin, P. E., Nygaard, L. C., & Howell, W. A. (1987). Perceptual normalization of vowels produced by sinusoidal voices. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *13*, 40-61.
- Repp, B. H. (1978). Perceptual integration and differentiation of spectral cues for intervocalic stop consonants. *Perception & Psychophysics*, *24*, 471-485.
- Repp, B. H. (1980). Accessing phonetic information during perceptual integration of temporally distributed cues. *Journal of Phonetics*, *8*, 185-194.
- Repp, B. H. (1984). Categorical perception: issues, methods, findings. In N. Lass (Ed.), *Speech and language: advances in basic research and practice* (Vol. 10, pp. 243-335).
- Repp, B. H., & Liberman, A. M. (1987). Phonetic category boundaries are flexible. In S. Harnad (Ed.), *Categorical Perception: The Groundwork of Cognition* (pp. 89-112). New York: Cambridge University Press.
- Rey, V., De Martino, S., Espesser, R., & Habib, M. (2002). Temporal processing and phonological impairment in dyslexia: Effect of phoneme lengthening on order judgment of two consonants. *Brain and Language*, *80*, 576-591.
- Rosen, G. D., Bai, J., Wang, Y., Fiondella, C. G., Threlkeld, S. W., LoTurco, J. J., et al. (2007). Disruption of neuronal migration by RNAi of DYX1C1 results in neocortical and hippocampal malformations. *Cerebral Cortex*, *17*, 2562-2572.
- Rosen, G. D., Burstein, D., & Galaburda, A. M. (2000). Changes in efferent and afferent connectivity in rats with induced cerebrocortical microgyria. *Journal of Comparative Neurology*, *418*, 423-440.
- Rosen, S. (1992). Temporal information in speech: Acoustic, auditory and linguistic aspects. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, *336*, 367-373.
- Rosen, S. (2003). Auditory processing in dyslexia and specific language impairment: is there a deficit? What is its nature? Does it explain anything? *Journal of Phonetics*, *31*, 509-527.
- Rosen, S., & Manganari, E. (2001). Is there a relationship between speech and nonspeech auditory processing in children with dyslexia? *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *44*, 720-736.
- Rosenzweig, M. R. (1951). Representations of the two ears at the auditory cortex. *American Journal of Physiology*, *167*, 147-158.
- Ruel, J., Nouvian, R., Gervais d'Aldin, C., Pujol, R., Eybalin, M., & Puel, J.-L. (2001). Dopamine inhibition of auditory nerve activity in the adult mammalian cochlea. *European Journal of Neuroscience*, *14*, 977-986.
- Rumsey, J., Casanova, M., Mannheim, G., Patronas, N., DeVaughn, N., Hamburger, S., et al. (1996). Corpus callosum morphology, as measured with MRI, in dyslexic men. *Biological Psychiatry*, *39*, 769-775.

- Rumsey, J., Donohue, B., Brady, D., Nace, K., Giedd, J., & Andreason, P. (1997). A magnetic resonance imaging study of planum temporale asymmetry in men with developmental dyslexia. *Archives of Neurology*, *54*, 1481-1489.
- Rumsey, J., Horwitz, B., Donohue, B., Nace, K., Maisog, J., & Andreason, P. (1999). A functional lesion in developmental dyslexia: left angular gyral blood flow predicts severity. *Brain and Language*, *70*, 187-204.
- Russo, N. M., Nicol, T. G., Zecker, S. G., Hayes, E. A., & Kraus, N. (2005). Auditory training improves neural timing in the human brainstem. *Behavioural Brain Research*, *156*, 95-103.
- Rutter, M., Caspi, A., Fergusson, D., Horwood, L., Goodman, R., Maughan, B., et al. (2004). Sex differences in developmental reading disability—new findings from 4 epidemiological studies. *Journal of the American Medical Association*, *291*, 2007–2012.
- Saberi, K., & Perrott, D. R. (1999). Cognitive restoration of reversed speech. *Nature*, *398*, 760.
- Saerens, M., Serniclaes, W., & Beeckmans, R. (1989). Acoustic versus contextual factors in stop voicing perception in spontaneous French. *Language and speech*, *32*, 291-314.
- Samuel, A. G. (1981). Phonemic restoration: insights from a new methodology. *Journal of Experimental Psychology: General*, *110*, 474-494.
- Scarborough, H. (1984). Continuity between childhood dyslexia and adult reading. *Brain Journal of Psychology*, *75*, 329-348.
- Scerri, T. S., Fisher, S. E., Francks, C., MacPhie, I. L., Paracchini, S., Richardson, A. J., et al. (2004). Putative functional alleles of DYX1C1 are not associated with dyslexia susceptibility in a large sample of sibling pairs from the UK. *Journal of Medical Genetics*, *41*, 853-857.
- Schönwiesner, M., Krumbholz, K., RübSamen, R., Fink, G., & von Cramon, D. (2007). Hemispheric Asymmetry for Auditory Processing in the Human Auditory Brain Stem, Thalamus, and Cortex. *Cerebral Cortex*, *17*, 492-499.
- Schulte-Körne, G., Bartling, J., Deimel, W., & Remschmidt, H. (2004). Motion-onset VEPs in dyslexia. Evidence for visual perceptual deficit. *Neuroreport*, *15*, 1075–1078.
- Schulte-Körne, G., Deimel, W., Bartling, J., & Remschmidt, H. (1998). Auditory processing and dyslexia: Evidence for a specific speech processing deficit. *NeuroReport*, *9*, 337-340.
- Schulte-Körne, G., Grimm, T., Nothen, M., Müller-Myhsok, B., Cichon, S., Vogt, I., et al. (1998). Evidence for linkage of spelling disability to chromosome 15. *American Journal of Human Genetics*, *63*, 279–282.
- Schumacher, J., Hoffmann, P., Schmal, C., Schulte-Körne, G., & Nöthen, M. (2007). Genetics of dyslexia: the evolving landscape. *Journal of Medical Genetics*, *44*, 289-297.
- Schwartz, J., & Tallal, P. (1980). Rate of acoustic change may underlie hemispheric specialization for speech perception. *Science*, *207*, 1380-1381.
- Scott, S. K., & Johnsrude, I. S. (2003). The neuroanatomical and functional organization of speech perception. *Trends in Neurosciences*, *26*, 100-107.
- Scott, S. K., & Wise, R. J. S. (2004). The functional neuroanatomy of prelexical processing in speech perception. *Cognition*, *92*, 13-45.
- Sebastián-Gallés, N., Dupoux, E., Segui, J., & Mehler, J. (1992). Contrasting syllabic effects in Catalan and Spanish. *Journal of Memory and Language*, *31*, 18-32.
- Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review*, *96*, 523-568.

- Seidenberg, M. S., Plaut, D. C., Petersen, A. S., McClelland, J. L., & McRae, K. (1994). Nonword pronunciation and models of word recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *20*, 1177-1196.
- Serniclaes, W. (1987). *Étude expérimentale de la perception du trait de voisement des occlusives du français*. Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgique.
- Serniclaes, W., Bogliotti, C., & Carré, R. (2003). *Perception of consonant place of articulation: phonological categories meet natural boundaries*. Paper presented at the The 15th International Congress of Phonetic Sciences, Barcelona, Spain.
- Serniclaes, W., & Sprenger-Charolles, L. (2003). Categorical perception of speech sounds and dyslexia. *Current Psychology Letters: Behaviour, Brain & Cognition*, *10*.
- Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., Carré, R., & Demonet, J. F. (2001). Perceptual categorization of speech sounds in dyslexics. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *44*, 384-399.
- Serniclaes, W., Van Heghe, S., Mousty, P., Carré, R., & Sprenger-Charolles, L. (2004). Allophonic mode of speech perception in dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, *87*, 336-361.
- Seymour, P. H. K. (1990). Developmental dyslexia. In M. W. Eysenck (Ed.), *Cognitive psychology: An international review* (pp. 135-196). Chichester: Wiley.
- Shadle, C. H. (1997). The Aerodynamics of Speech. In W. J. Hardcastle & J. Laver (Eds.), *Handbook of Phonetics* (pp. 33-64): Blackwell's.
- Shannon, R. V., Zeng, F.-G., Kamath, V., Wygonski, J., & Ekelid, M. (1995). Speech recognition with primarily temporal cues. *Science*, *270*, 303-304.
- Shapleske, J., Rossell, S., Woodruff, P., & David, A. (1999). The planum temporale: a systematic, quantitative review of its structural, functional and clinical significance. *Brain Research Reviews*, *29*, 26-49.
- Shaywitz, B., Shaywitz, S., Blachman, B., Pugh, K., Fulbright, R., Skudlarski, P., et al. (2004). Development of left occipitotemporal systems for skilled reading in children after a phonologically-based intervention. *Biological Psychiatry*, *55*, 926-933.
- Shaywitz, S. (1998). Dyslexia. *New England Journal of Medicine*(338), 307-312.
- Shaywitz, S., Fletcher, J., Holahan, J., Shneider, A., Marchione, K., Stuebing, K., et al. (1999). Persistence of dyslexia: the Connecticut Longitudinal Study at adolescence. *Pediatrics*, *104*, 1351-1359.
- Shaywitz, S., Shaywitz, B., Fletcher, J., & Escobar, M. (1990). Prevalence of reading disability in boys and girls. Results of the Connecticut Longitudinal Study. *The Journal of the American Medical Association*, *264*, 998-1002.
- Shaywitz, S., Shaywitz, B., Fulbright, R., Skudlarski, P., Mencl, W., Constable, R., et al. (2003). Neural systems for compensation and persistence: young adult outcome of childhood reading disability. *Biological Psychiatry*, *54*, 25-33.
- Shaywitz, S., Shaywitz, B., Pugh, K., Fulbright, R., Constable, R., Mencl, W., et al. (1998). Functional disruption in the organization of the brain for reading in dyslexia. *Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america*, *95*, 2636-2641.
- Shinn, P., Blumstein, S. E., & Jongman, A. (1985). Limitations of context conditioned effects in the perception of [b] and [w]. *Perception & Psychophysics*, *38*, 397-407.
- Shtyrov, Y., Kujala, T., Ahveninen, J., Tervaniemi, M., Alku, P., Ilmoniemi, R. J., et al. (1998). Background acoustic noise and the hemispheric lateralization of speech processing in the human brain: magnetic mismatch negativity study. *Neuroscience Letters*, *251*, 141-144.

- Silani, G., Frith, U., Demonet, J. F., Fazio, F., Perani, D., Price, C. J., et al. (2005). Brain abnormalities underlying altered activation in dyslexia: a voxel based morphometry study. *Brain*, *128*, 2453-2461.
- Simos, P. G., Breier, J. I., Fletcher, J. M., Bergman, E., & Papanicolaou, A. C. (2000). Cerebral mechanisms involved in word reading in dyslexic children: A magnetic source imaging approach. *Cerebral Cortex*, *10*, 809-816.
- Simos, P. G., Breier, J. I., Fletcher, J. M., Foorman, B. R., Bergman, E., & Fishbeck, K. (2000). Brain activation profiles in dyslexic children during non-word reading: a magnetic source imaging study. *Neuroscience Letters*, *290*, 61-65.
- Simos, P. G., Fletcher, J. M., Bergman, E., Breier, J. I., Foorman, B. R., Castillo, E. M., et al. (2002). Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology*, *58*, 1203-1213.
- Skoff, B. F., Mersky, A. F., & Turner, D. (1980). Prolonged brainstem transmission time in autism. *Psychiatry Research*, *2*, 157-166.
- Smith, S. D., Kimberling, W. J., Pennington, B. F., & Lubs, H. A. (1983). Specific reading disability: identification of an inherited form through linkage analysis. *Science*, *219*, 1345-1347.
- Smits, R., Ten Bosch, L., & Collier, R. (1996a). Evaluation of various sets of acoustic cues for the perception of prevocalic stop consonants. I. Perception experiment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *100*, 3852-3864.
- Smits, R., ten Bosch, L., & Collier, R. (1996b). Evaluation of various sets of acoustic cues for the perception of prevocalic stop consonants. II. Modeling and evaluation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *100*, 3865-3881.
- Snoeren, N. D., Hallé, P. A., & Segui, J. (2006). A voice for the voiceless: Production and perception of assimilated stops in French. *Journal of Phonetics*, *34*, 241-268.
- Snowling, M., Goulandris, N., Bowlby, M., & Howell, P. (1986). Segmentation and speech perception in relation to reading skill: A developmental analysis. *Journal of Experimental Child Psychology*, *41*, 489-507.
- Snowling, M. J. (1981). Phonemic deficits in developmental dyslexia. *Psychological Research*, *43*, 219-234.
- Snowling, M. J. (2000). *Dyslexia*. Oxford: Blackwell.
- Snowling, M. J. (2001). From language to reading and dyslexia. *Dyslexia*, *7*, 37-46.
- Snowling, M. J., Bishop, D. V. M., & Stothard, S. E. (2000). Is pre-school language impairment a risk factor for dyslexia in adolescence? *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *41*, 587-600.
- Sprenger-Charolles, L., & Casalis, S. (1996). *Lire. Lecture/écriture: Acquisition et troubles du développement*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Lacert, P., & Serniclaes, W. (2000). On subtypes of developmental dyslexia: Evidence from processing time and accuracy scores. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, *54*, 88-104.
- Stein, J. F. (1994). Developmental dyslexia, neural timing and hemispheric lateralisation. *International Journal of Psychophysiology*, *18*, 241-249.
- Stein, J. F. (2001). The magnocellular theory of developmental dyslexia. *Dyslexia*, *7*, 12-36.
- Stein, J. F., & Fowler, S. (1981). Visual dyslexia. *Trends in Neurosciences*, *4*, 77-80.
- Stein, J. F., Richardson, A. J., & Fowler, M. S. (2000). Monocular occlusion can improve binocular control and reading in dyslexics. *Brain*, *123*, 164-170.
- Stein, J. F., & Walsh, V. (1997). To see but not to read; the magnocellular theory of dyslexia. *Trends in Neurosciences*, *20*, 147-152.

- Stephan, K. E., Marshall, J. C., Friston, K. J., Rowe, J. B., Ritzl, A., Zilles, K., et al. (2003). Lateralized cognitive processes and lateralized task control in the human brain. *Science*, *301*, 384-386.
- Stevens, K. N., & Blumstein, S. E. (1978). Invariant cues for place of articulation in stop consonants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *64*, 1358-1368.
- Stevens, K. N., & Blumstein, S. E. (1981). The search for invariant acoustic correlates of phonetic features. In P. D. Eimas & J. L. Miller (Eds.), *Perspectives on the study of speech* (pp. 1-38). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Stevens, K. N., Keyser, S. J., & Kawasaki, H. (1986). Toward a phonetic and phonological theory of redundant features. In J. S. Perkell & D. H. Klatt (Eds.), *Invariance and variability in speech processes* (pp. 426-449). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Strange, W. (1989). Dynamic specification of coarticulated vowels spoken in sentence context. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *85*, 2135-2153.
- Strange, W., Jenkins, J. J., & Johnson, T. L. (1983). Dynamic specification of coarticulated vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *74*, 695-705.
- Streeter, L. A., & Nigro, G. N. (1979). The role of medial consonant transitions in word perception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *65*, 1533-1541.
- Studdert-Kennedy, M. (2002). Mirror neurons, vocal imitation and the evolution of particulate speech. In M. Stamenov & V. Gallese (Eds.), *Mirror neurons and the evolution of brain and language* (pp. 207-227). Amsterdam: John Benjamins.
- Suga, N., Xiao, Z., Ma, X., & Ji, W. (2002). Plasticity and Corticofugal Modulation for Hearing in Adult Animals. *Neuron*, *36*, 9-18.
- Summerfield, Q. (1975). Aerodynamics versus mechanics in the control of voicing onset in consonant-vowel syllables. In *Speech perception*. Belfast: Queen's University, Department of Psychology.
- Summerfield, Q. (1981). Articulatory rate and perceptual constancy in phonetic perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *7*, 1074-1095.
- Sussman, H. M., McCaffrey, H. A., & Matthews, S. A. (1991). An investigation of locus equations as a source of relational invariance for stop place categorization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *90*, 1309-1325.
- Taft, M. (1979). Lexical access via an orthographic code: the Basic Orthographic Syllabic Structure (BOSS). *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *18*, 21-39.
- Taipale, M., Kaminen, N., Nopola-Hemmi, J., Haltia, T., Myllyluoma, B., Lyytinen, H., et al. (2003). A candidate gene for developmental dyslexia encodes a nuclear tetratricopeptide repeat domain protein dynamically regulated in brain. *Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america*, *100*, 11553-11558.
- Tallal, P. (1980a). Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain and Language*, *9*, 182-198.
- Tallal, P. (1980b). Language and reading: Some perceptual prerequisites. *Annals of Dyslexia*, *30*, 170-178.
- Tallal, P. (1984). Temporal or Phonetic Processing Deficit in Dyslexia? *Applied Psycholinguistics*, *5*, 167-169.
- Tallal, P., Allard, L., Miller, S. L., & Curtiss, S. (1997). Academic outcomes of language impaired children. In C. Hulme & M. Snowling (Eds.), *Dyslexia: Biology, cognition and intervention*. London: Whurr Publishers Limited.
- Tallal, P., Miller, S. L., Bedi, G., Byma, G., Wang, X., Nagarajan, S. S., et al. (1996). Language comprehension in language-learning impaired children improved with acoustically modified speech. *Science*, *271*, 81-83.

- Tallal, P., & Piercy, M. (1973). Developmental aphasia: impaired rate of non-verbal processing as a function of sensory modality. *Neuropsychologia*, *11*, 389-398.
- Tallal, P., & Piercy, M. (1974). Developmental aphasia: rate of auditory processing and selective impairment of consonant perception. *Neuropsychologia*, *12*, 83-93.
- Tallal, P., & Piercy, M. (1975). Developmental aphasia: The perception of brief vowels and extended stop consonants. *Neuropsychologia*, *13*, 69-74.
- Tallal, P., & Stark, R. E. (1981). Speech acoustic-cue discrimination abilities of normally developing and language-impaired children. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *69*, 568-574.
- Tarter, V. C., Kat, D., Samuel, A. G., & Repp, B. H. (1983). Perception of intervocalic stop consonants: the contributions of closure duration and formant transitions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *74*, 715-725.
- Temple, E., Deutsch, G. K., Poldrack, R. A., Miller, S. L., Tallal, P., Merzenich, M. M., et al. (2003). Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: Evidence from functional MRI. *Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america*, *100*, 2860-2865.
- Temple, E., Poldrack, R. A., Protopapas, A., Nagarajan, S. S., Salz, T., Tallal, P., et al. (2000). Disruption of the neural response to rapid acoustic stimuli in dyslexia: Evidence from functional MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *97*, 13907-13912.
- Temple, E., Poldrack, R. A., Salidis, J., Deutsch, G. K., Tallal, P., Merzenich, M. M., et al. (2001). Disrupted neural responses to phonological and orthographic processing in dyslexic children: an fMRI study. *Neuroreport*, *12*, 299-307.
- Thompson, A. M., & Schofield, B. R. (2000). Afferent projections of the superior olivary complex. *Microscopy Research and Technique*, *51*, 330-354.
- Treiman, R. (1985). Spelling of stop consonants after /s/ by children and adults. *Applied Psycholinguistics*, *6*, 261-282.
- Trubetzkoy, N. S. (1939). Grundzüge der Phonologie. *Travaux du cercle linguistique de Prague*, *7*, 272.
- Tuller, B., Case, P., Ding, M., & Kelso, J. A. S. (1994). The nonlinear dynamics of speech categorization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *20*, 3-16.
- Turkeltaub, P. E., Gareau, L., Flowers, D. L., Zeffiro, T. A., & Eden, G. F. (2003). Development of neural mechanisms for reading. *Nature Neuroscience*, *6*, 767-773.
- Valdois, S., Bosse, M.-L., Ans, B., Carbonnel, S., Zorman, M., David, D., et al. (2003). Phonological and visual processing deficits can dissociate in developmental dyslexia: Evidence from two case studies. *Reading and Writing*, *16*, 541-572.
- Valdois, S., Bosse, M.-L., & Tainturier, M.-J. (2004). The cognitive deficits responsible for developmental dyslexia: Review of evidence for a selective visual attentional disorder. *Dyslexia*, *10*, 339-363.
- Van Orden, G. C. (1987). A ROWS is a ROSE: spelling, sound, and reading. *Memory & Cognition*, *15*, 181-198.
- van Wieringen, A., & Pols, L. C. W. (1995). Discrimination of single and complex consonant-vowel-and vowel-consonant-like formant transitions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *98*, 1304-1312.
- Velenovsky, D., & Glatke, T. (2002). The effect of noise bandwidth on the contralateral suppression of transient evoked otoacoustic emissions. *Hearing Research*, *164*, 39-48.
- Vellutino, E. R. (1979). *Dyslexia: Theory and research*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Verbrugge, R. R., & Isenberg, D. (1978). Syllable timing and vowel perception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *63*, S4.

- VeUILLET, E., Bazin, F., & Collet, L. (1999). Objective evidence of peripheral auditory disorders in learning-impaired children. *Journal of Audiological Medicine*, 8, 18-29.
- VeUILLET, E., Collet, L., & Duclaux, R. (1991). Effect of contralateral acoustic stimulation on active cochlear micromechanical properties in human subjects: Dependence on stimulus variables. *Journal of Neurophysiology*, 65, 724-734.
- VeUILLET, E., Georgieff, N., Philibert, B., Dalery, J., Marie-Cardine, M., & Collet, L. (2001). Abnormal peripheral auditory asymmetry in schizophrenia. *Journal of Neurology Neurosurgery and Psychiatry*, 70, 88-94.
- VeUILLET, E., Khalifa, S., & Collet, L. (1999). Clinical relevance of medial efferent auditory pathways. *Scandinavian Audiology. Supplementum*, 51, 53-62.
- VeUILLET, E., Magnan, A., & Ecalle, J. (2004). Déficits auditifs perceptifs et capacités en lecture chez les enfants dyslexiques : effet d'un entraînement audio-visuel. *Revue de Neuropsychologie*, 14, 103-132.
- VeUILLET, E., Magnan, A., Ecalle, J., Thai-Van, H., & Collet, L. (2007). Auditory processing disorder in children with reading disabilities: Effect of audiovisual training. *Brain*, 130, 2915-2928.
- Vidyasagar, T. R. (2004). Neural underpinnings of dyslexia as a disorder of visuo-spatial attention. *Clinical and Experimental Optometry*, 87, 4-10.
- Vigneau, M., Beaucousin, V., Hervé, P. Y., Duffau, H., Crivello, F., Houdé, O., et al. (2006). Meta-analyzing left hemisphere language areas: Phonology, semantics, and sentence processing. *NeuroImage*, 30, 1414-1432.
- Vinckenbosch, E., Robichon, F., & Eliez, S. (2005). Gray matter alteration in dyslexia: converging evidence from volumetric and voxel-by-voxel MRI analyses. *Neuropsychologia*, 43, 324-331.
- Virole, B., & Cosnier, J. (2004). La perception phonétique. In *Psychologie de la surdité* (pp. 101-133). Bruxelles: De Boeck Université.
- Wagner, R., & Torgesen, J. (1987). The nature of phonological processing and its causal role in the acquisition of reading skills. *Psychological Bulletin*, 101, 192-212.
- Wang, Y., Paramasivam, M., Thomas, A., Bai, J., Kaminen-Ahola, N., Kere, J., et al. (2006). DYX1C1 functions in neuronal migration in developing neocortex. *Neuroscience*, 143, 515-522.
- Warr, W., & Guinan, J. J. (1979). Efferent innervation of the organ of corti: two separate systems. *Brain Research*, 173, 152-155.
- Warren, R. M. (1970). Perceptual restoration of missing speech sounds. *Science*, 167, 392-393.
- Warren, R. M. (1974). Auditory temporal discrimination by trained listeners. *Cognitive Psychology*, 6, 237-256.
- Wernicke, C. (1874). *Der Aphasische Symptomencomplex* Breslau: Cohn and Weigert.
- Whalen, D. H. (1991). Subcategorical phonetic mismatches and lexical access. *Perception & Psychophysics*, 50, 351-360.
- Wible, B., Nicol, T., & Kraus, N. (2005). Correlation between brainstem and cortical auditory processes in normal and language-impaired children. *Brain*, 128, 417-423.
- Wigg, K., Couto, J., Feng, Y., Anderson, B., Cate-Carter, T., Macciardi, F., et al. (2004). Support for EKN1 as the susceptibility locus for dyslexia on 15q21. *Molecular Psychiatry*, 9, 1111-1121.
- Wimmer, H., Mayringer, H., & Landerl, K. (1998). Poor Reading: A Deficit in Skill-Automatization or a Phonological Deficit? *Scientific Studies of Reading*, 2, 321-340.
- Witton, C., Talcott, J. B., Hansen, P. C., Richardson, A. J., Griffiths, T. D., Rees, A., et al. (1998). Sensitivity to dynamic auditory and visual stimuli predicts nonword reading ability in both dyslexic and normal readers. *Current Biology*, 8, 791-797.

- Wolf, M., & Bowers, P. (1999). The double-deficit hypothesis for the developmental dyslexias. *Journal of Educational Psychology, 91*, 415–438.
- Wright, B. A., Lombardino, L. J., King, W. M., Puranik, C. S., Leonard, C. M., & Merzenich, M. M. (1997). Deficits in auditory temporal and spectral resolution in language-impaired children. *Nature, 387*, 176-178.
- Wright, R. (2001). Perceptual cues in contrast maintenance. In E. Hume & K. Johnson (Eds.), *The role of speech perception in phonology* (pp. 251-277). San Diego: Academic Press.
- Xiao, Z., & Suga, N. (2002). Reorganization of the cochleotopic map in the bat's auditory system by inhibition. *Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america, 99*, 15743-15748.
- Zagar, D., Jourdain, C., & Lété, B. (1995). Le diagnostic cognitif des capacités de lecture : le logiciel ECCLA : (Evaluation diagnostic des Capacités Cognitives du Lecteur Adulte). *Revue française de pédagogie, 113*, 19-29.
- Zatorre, R. J., Belin, P., & Penhune, V. B. (2002). Structure and function of auditory cortex: Music and speech. *Trends in Cognitive Sciences, 6*, 37-46.
- Zatorre, R. J., Evans, A. C., Meyer, E., & Gjedde, A. (1992). Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science, 256*, 846-849.
- Zemlin, W. R., Daniloff, R. G., & Shriner, T. H. (1968). The difficulty of listening to time-compressed speech. *Journal of Speech and Hearing Research, 11*, 875-881.
- Ziegler, J. C., Pech-Georgel, C., George, F., Alario, F.-X., & Lorenzi, C. (2005). Deficits in speech perception predict language learning impairment. *Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america, 102*, 14110–14115.
- Ziegler, J. C., Van Orden, G. C., & Jacobs, A. M. (1997). Phonology can help or hurt the perception of print. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance, 23*, 845-860.
- Zue, V. (1976). *Acoustic Characteristics of Stop Consonants: A Controlled Study*. M.I.T.

ANNEXES

Annexe 1 : Les consignes des 15 épreuves du logiciel ECCLA.

▪ Première Session

1. **Tâche de réaction simple** : un petit trait va apparaître au centre de l'écran. Dès que le cœur apparaît, vous devez appuyer.
Tâche de réaction à choix forcé : un petit trait va s'afficher. Vous devez décider si Oui ou Non ce qui apparaît est un cœur.
2. **Codage abstrait des lettres** : Vous devez dire le plus rapidement possible si Oui ou Non ces deux lettres sont les mêmes. Sans tenir compte de la façon dont elles sont écrites. **Par ex., f B (non), D d (oui).**
3. **Lecture en contexte** : Vous allez lire des **textes mot à mot**. Lisez ainsi les textes sans vous arrêter, à votre rythme (le sujet contrôle la présentation des mots à l'écran).

▪ Deuxième Session

- Tâche de réaction à choix forcé**
4. **Jugement d'identité de lettres** : Vous devez dire le plus rapidement possible si Oui ou Non toutes les lettres de la suite sont identiques. **Par ex., HGH (non), QQQQQQQQQO (non).**
 5. **Similitude 2** : Vous devez dire le plus rapidement possible si Oui ou Non les deux suites sont identiques. **Par ex., TANOL TANIL (non).**
 6. **Décision lexicale 1** : Vous devez dire le plus vite possible si la suite de lettres est un mot qui existe ou pas (dans la langue française).
 7. **Décision phonologique à choix 1** : Vous devez dire le plus rapidement possible si Oui ou Non les deux suites de lettres se prononcent de la même manière. **Par ex., orsage orcage (non), aumir eaumir (oui).**
 8. **Lecture hors contexte** : Vous allez **lire des mots les uns après les autres**. Lisez ainsi la liste de mots à votre rythme (le sujet contrôle la présentation des mots à l'écran).

▪ Troisième Session

- Tâche de réaction à choix forcé**
9. **Décision lexicale 2**
 10. **Amorçage orthographique** : Vous allez voir apparaître une suite de dièses #####, suivi soit par un mot, soit par un non-mot. Vous devez décider si cette suite de lettres est un mot ou pas. Entre la disparition des signes et l'apparition de la suite de lettres, vous verrez peut-être certaines fois un mot. Vous ne devez pas vous en occuper. **Par ex., #####/porte (oui), #####/cogat (non).**
 11. **Catégorisation sémantique** : Vous allez tout d'abord voir un mot écrit en majuscules : FLEUR. OISEAU... suivi d'un autre mot en minuscules. Vous devez dire le plus vite possible si ce mot est de la même catégorie. **Par ex., FRUIT et ensuite « poire » (oui), LEGUME/« chaise » (non).**
 12. **Décision phonologique à choix 2**

▪ Quatrième Session

- Tâche de réaction à choix forcé**
13. **Décision lexicale 3**
 14. **Similitude 1**
 15. **Décision phonologique** : Vous devez décider si la suite de lettre qui apparaît à l'écran se prononce comme un mot qui existe en français ou pas. **Par ex., kabine (oui), vaire (oui), mesure (non).**

Annexe 2 : Feuille de Protocole du test de lecture, l'Alouette.

L'ALOUETTE

TEST D'ANALYSE DE LA LECTURE ET DE LA DYSLEXIE
FEUILLE DE PROTOCOLE

NOM _____ Prénom _____ Date _____

Sous la mousse ou sur le toit, dans les haies vives ou le chêne fourchu, le printemps a mis	19
ses nids. Le printemps a nids au bois. Annie amie, du renouveau, c'est le doux temps.	35
Amie Annie, au bois joli gamine le pinson. Dans les buis, gîte une biche, au bois chantant.	52
Annie! Annie! au doigt joli, une églantine laisse du sang : au bout du temps des féeries	68
viendra l'ennui. L'alouette fait ses jeux; alouette fait un nœud avec un rien de paille.	83
L'hirondeau piaille sous la pente des bardeaux et, vif et gai, le geai, sur l'écaille argentée	99
du bouleau, promène un brin d'osier. Au verger, dans le soleil matinal, goutte une pompe	114
dégelée. On voit un bec luisant qui trille éperdument des notes claires et, dans les	129
pampres d'or que suspend la grille antique, on surprend des rixes de moineaux. Au	143
potager s'alignent les cordons; l'if est triste à l'horizon et lourd et lent l'envol des	158
corbeaux. Un lac étire ses calmes rives et, quand le soir descend, le miroir de ses eaux	175
reflète les poisons des brignoles perfides. Et, quand descend le soir, quand joue la	189
pourpre du couchant, le ciel rougit ses eaux. Dans la moire de l'eau danse l'ombre d'un	205
écueil. Tout est cris! Tout est bruits! Une amarre est décochée... une barque est arrimée...	220
des matelots jettent leurs cassettes sur le rivage... Tout est cris! Tout est bruits! Au clair	236
de la lune mon ami Pierrot... Au clair de lune mon amie Annie... Au clair de la	253
lune mon ami Pierrot; prête-moi la plume pour écrire un mot.	265

o u e i a

le la les un dans des do ti pu mi

EDITIONS DU CENTRE DE PSYCHOLOGIE APPLIQUEE, 25, rue de la Plaine 75980 PARIS Cedex 20

Copyright 1965 by Centre de Psychologie Appliquée

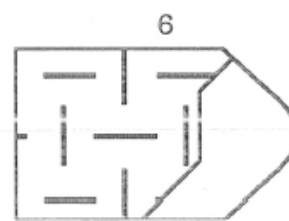
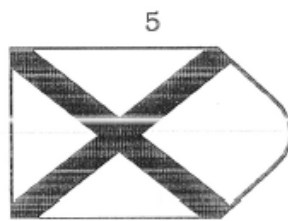
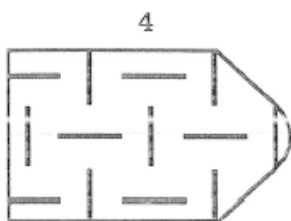
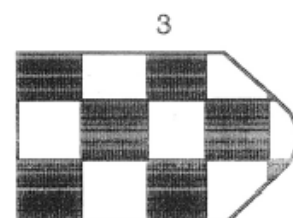
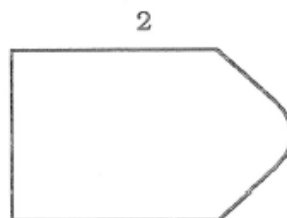
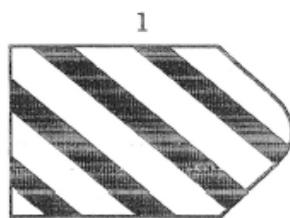
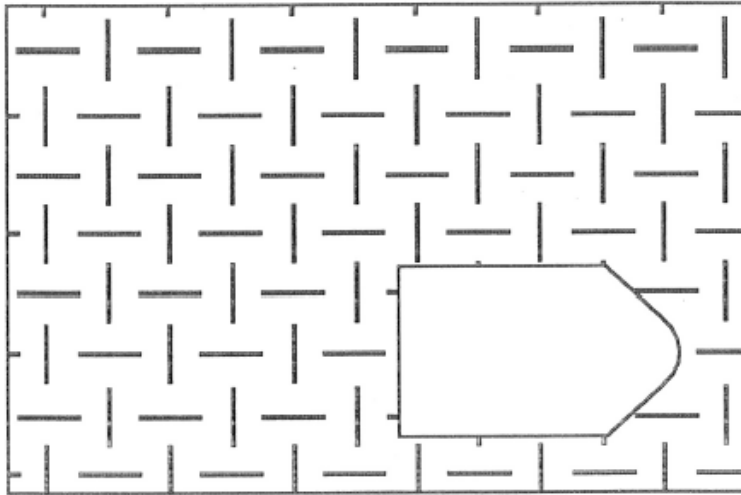
TOUS DROITS RÉSERVES

Dépôt légal : Editeur n° 401-1001 - 1er trimestre 1965. Imp. Express-Tirages

Annexe 3 : Exemple du premier essai de la première série (A1) des Matrices Progressives de Raven.

SET A

A1



Annexe 4 : Feuille de Réponse au test de Latéralité d'Edinburgh.

TEST de LATÉRALITÉ d'EDINBURGH

(Edinburgh Handedness Inventory)

Référence :

Oldfield R.C. (1971). The assessment and analysis of handedness : The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 9 : 97-111.

Date : Examineur :

Nom : Prénom : Sexe :

Indiquez s'il vous plaît vos préférences d'utilisation des mains dans les activités suivantes en mettant + dans la colonne correspondante. Lorsque la préférence est si marquée que vous n'utiliserez l'autre main que si vous ne pouvez faire autrement, mettre ++. Dans le cas où une tâche ou un geste sont réalisés indifféremment par les deux mains, mettre + dans les deux colonnes.

Certaines activités nécessitent les deux mains. Dans ce cas, la partie de la tâche, ou de l'objet, pour lequel une préférence manuelle est nécessaire est indiquée entre parenthèses.

Essayez s'il vous plaît de répondre à toutes les questions, et laissez un blanc seulement dans le cas où vous n'avez aucune expérience de l'activité ou de l'usage de l'objet.

Pour calculer le quotient de latéralité :

$$QL = \frac{(\text{différence D-G})}{(\text{somme D+G})} \times 100$$

Items	Gauche	Droite
1-Ecrire		
2- Dessiner		
3-Lancer (un objet ou une balle)		
4- Tenir des ciseaux et découper		
5- Se brosser les dents		
6- Se servir d'un couteau (sans fourchette)		
7- Se servir d'une cuillère		
8- Balayer (main au dessus)		
9- Frotter une allumette		
10- Ouvrir le couvercle d'une boîte		
Shooter dans un ballon		
Oeil de visée		
Total du nombre de croix par colonne NB : Ne pas comptabiliser les items " Shooter dans un ballon " et " Oeil de visée " qui n'entrent pas dans ce total ni dans le calcul du QL		

QL :

DECILE :

